

Фотометрические исследования катаклизмических переменных звезд

Голышева П.Ю., ГАИШ МГУ

Катаклизмические переменные (КП) – это тесные двойные системы (ТДС) на поздней стадии эволюции. Они состоят из звезды донора - красного карлика главной последовательности и белого карлика (БК).

По характеру вспышек дисковые КП (магнитное поле $\ll 1$ МГс) разделяются на новые, повторные новые, новоподобные, карликовые новые.

Из-за аккреции вещества от донора на БК вокруг него образуется аккреционный диск. При определенных условиях диск может резко увеличить светимость, и мы наблюдаем вспышку звезды.

Вспышки карликовых новых (звезд типа U Gem) длятся от нескольких суток до 20 дней, амплитуда вспышек 2-6 mag, интервал между вспышками от 10 дней до десятков лет.

Форма кривой блеска различается для различных подтипов карликовых новых – UGSS, UGZ, UGSU.

UGSU – наряду с нормальными вспышками, показывают супервспышки с более длительной, около двух недель, продолжительностью, и, как правило, с большей амплитудой, а также наличием на кривой блеска так называемых “сверхгорбов” (“суперхампов”) с периодом на 3–6% больше орбитального. Имеются предельные случаи: звезды типа ER UMa, системы с очень короткими циклами, и звезды типа WZ Sge, у которых наблюдаются только супервспышки.

Задачи

- Фотометрический мониторинг малоизученных КП, обработка ПЗС-наблюдений методом апертурной фотометрии;
- анализ кривых блеска во время вспышек и в спокойном состоянии;
- уточнение классификации исследуемых КП;
- поиск и анализ периодичностей у систем;
- изучение орбитальной переменности у затменных систем;
- изучение цветовых изменений в течение нескольких дней и/или часов.

Аппаратура

Словакия:

- 18/225 см телескоп системы Максудова/ SBIG ST-10XME;
- 50/250 см телескоп системы Ньютона/ SBIG ST-10XME;
- 60/750 см Цейсс/ FLI ML 3041, MIG-4;

Крымская лаборатория ГАИШ:

- 60/750 см Цейсс-2/ Apogee-47p, Apogee USB/Net;
- 50/200 см телескоп системы Максудова/ Pictor-416; Apogee Alta U16M;
- 125/2000 см ЗТЭ/ Verss-Array;

А также телескопы:

- 250/2000 см телескоп КГО ГАИШ/ E2V CCD44-82;
- 100/1330 см телескоп САО РАН/ EV-4240.

Исследуемые объекты можно сгруппировать по следующим разделам:

- затменные КП (V1239 Her (тип SU UMa), новоподобные звезды UU Aqr, KN Cet, карликовые новые EX Dra, V2051 Oph, OV Boo (тип SU UMa), карликовая новая 1SWASP J1621);
- звезды типа SU UMa во время вспышек (OV Boo, PNV J1915, ASASSN-15po, V2051 Oph);
- КП с нетипичными кривыми блеска (карликовые новые HS 0218, 1SWASP J1621, новоподобная V380 Oph).

Наблюдения и анализ кривых блеска затменной карликовой новой типа SU UMa V1239 Her

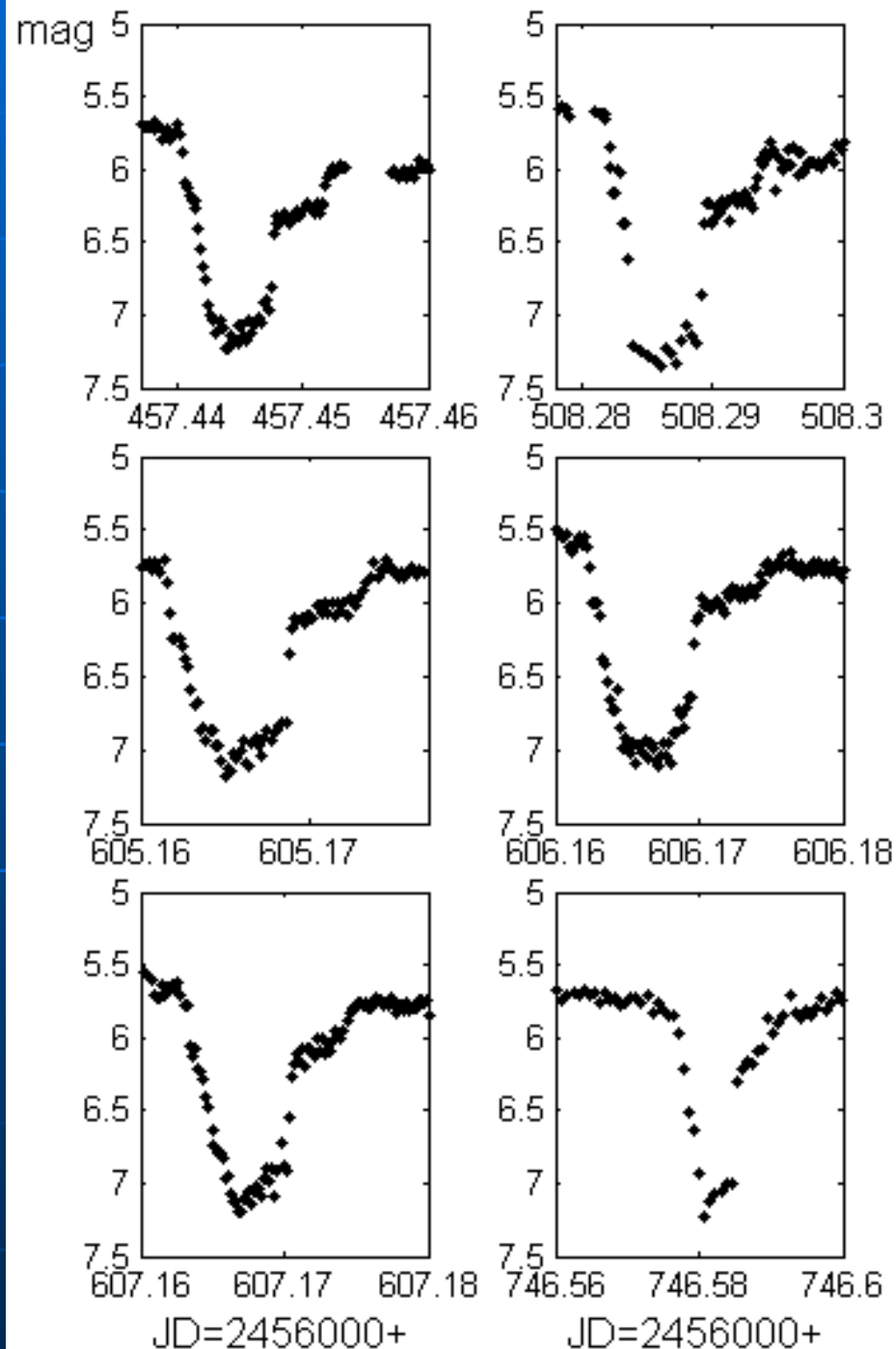
V1239 Her была открыта как новая затменная КП по обзору Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Szkody et al., 2004).

Найденный период в 2.4 ч попадает в знаменитый “пробел периодов” (2 – 3 h), что делает звезду интересным объектом для исследований.

В течение супервспышек 2005 (Boyd et al., 2006) и 2011 гг. (Kato et al., 2013) был найден период на 5% превышающий орбитальный и интерпретируемый как период суперхампов.

- Наблюдения 2013-14 гг. были получены с временным разрешением от 12 до 45 сек в белом (интегральном) свете на 60 и 125-см телескопах Словацкой АН и Крымской лаборатории ГАИШ.
Звезда находилась в неактивном состоянии.

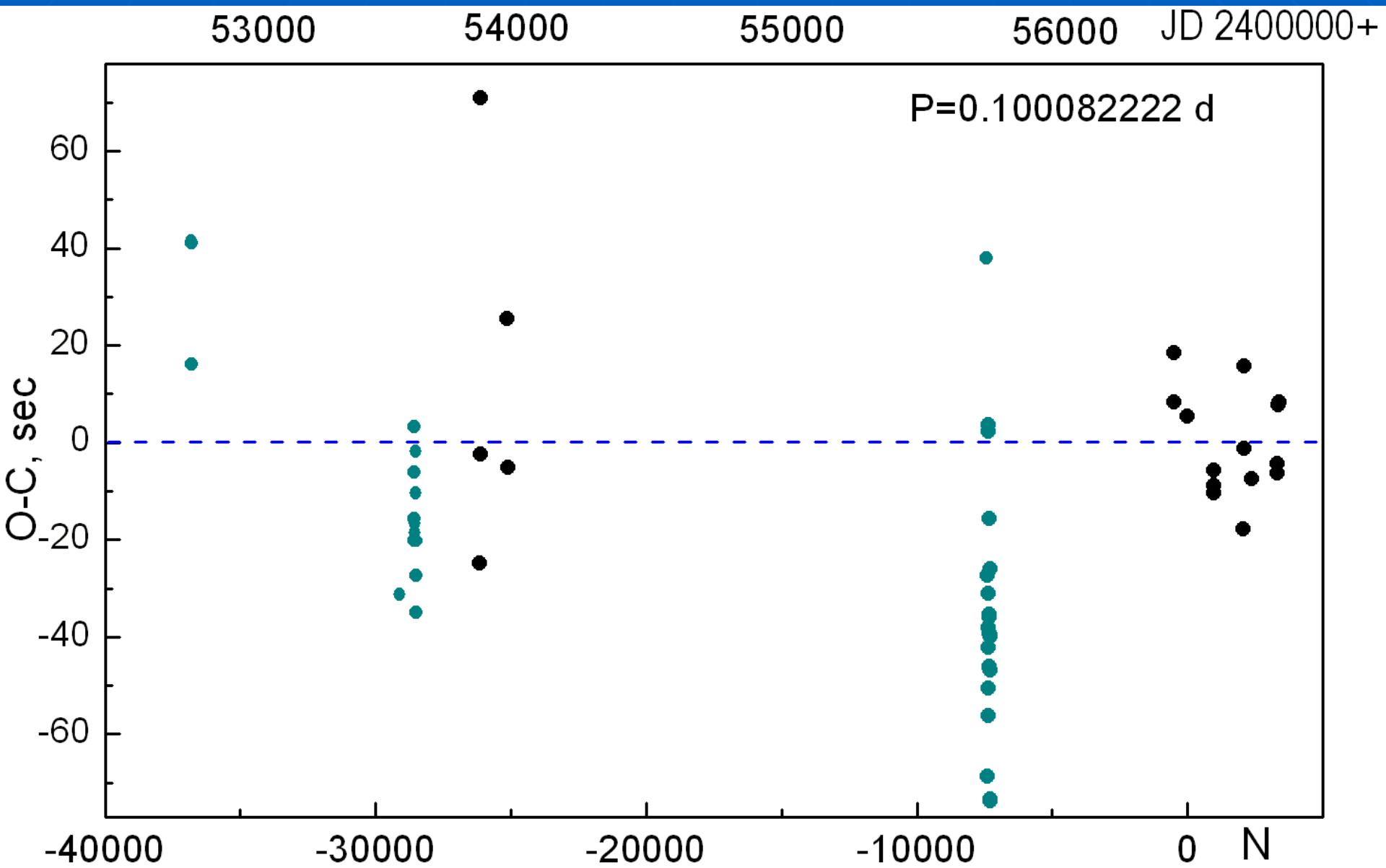
Профили затмений в течение 6-ти ночей. Заметно довольно быстрое падение блеска, которое соответствует входу в затмение БК и аккреционного диска и ступенчатый характер выхода из затмения: а) быстрое возрастание блеска соответствует выходу из затмения БК, b) следующий шаг более пологий, вызванный выходом из затмения диска, с) маленький пик свидетельствует о наличии области с горячим пятном.



Используя также моменты минимумов из статей др. авторов, нами были рассчитаны следующая эфемерида:

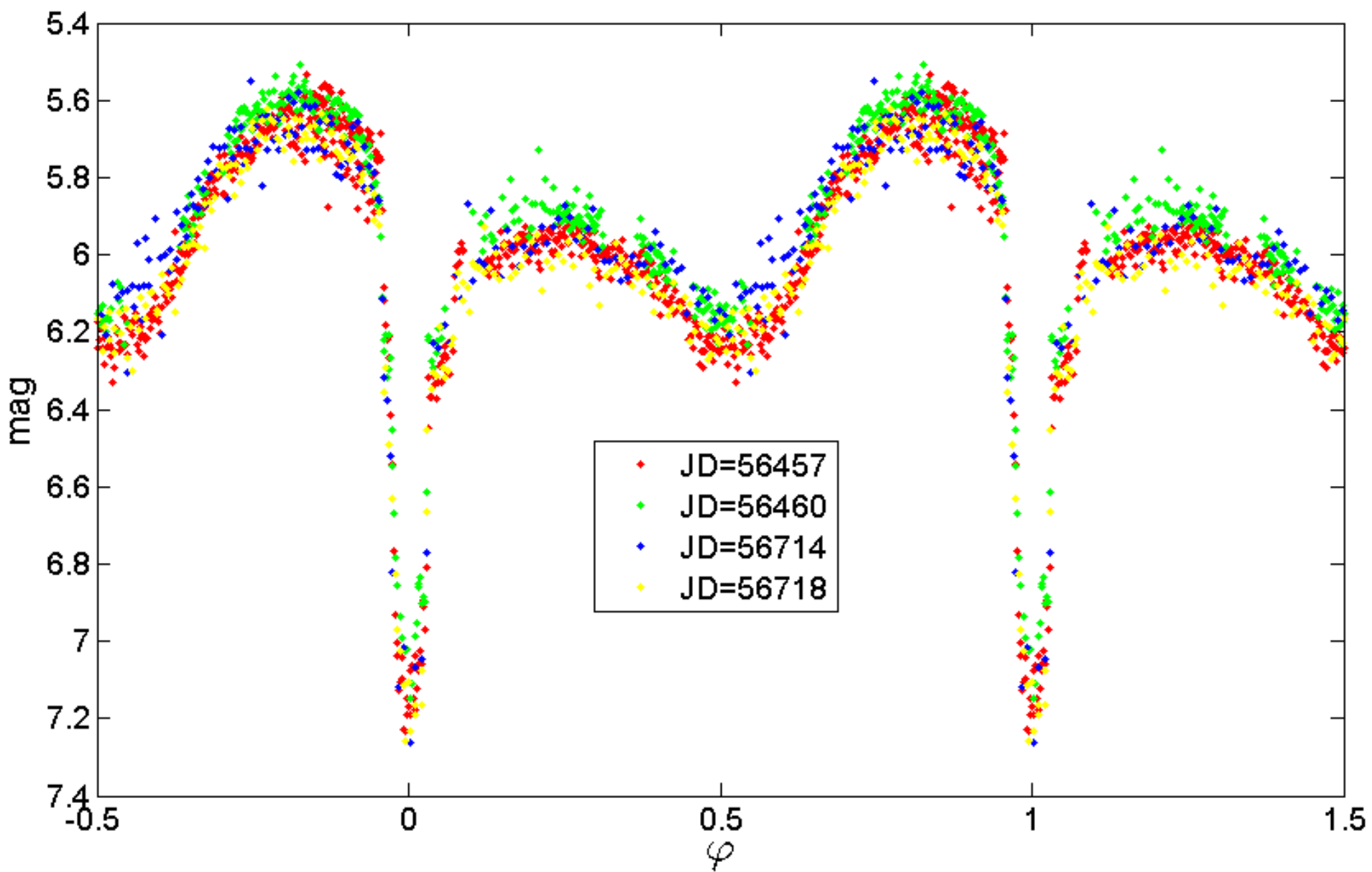
$$\text{Min}(\text{hel}) = 2456508.28634 + 0.100082222 * E.$$

По всем доступным данным построена зависимость от времени разности наблюдаемых и вычисленных по эфемеридам моментов минимумов O-C. Наши наблюдения отмечены черными кружками, наблюдения др. авторов – голубыми кружками.



Дальше будут представлены фазовые кривые блеска. Для свертки были использованы наблюдения 4-х ночей с явным присутствием предзатменного горба на кривых блеска.

После хампа можно видеть резкий глубокий минимум, длящийся 14 мин., также видно вторичное затмение. Амплитуда горба ~ 0.4 mag, общая амплитуда составляет ~ 1.65 mag.

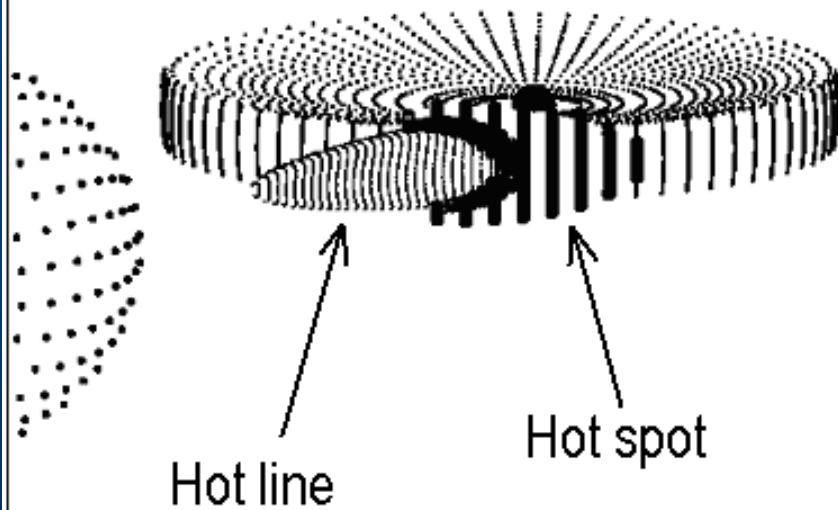


Модель “горячая линия и горячее пятно” (*D.Bisikalo, A.Boyarchuk et al;* 2004). Моделирование проведено Т.С. Хрузиной.

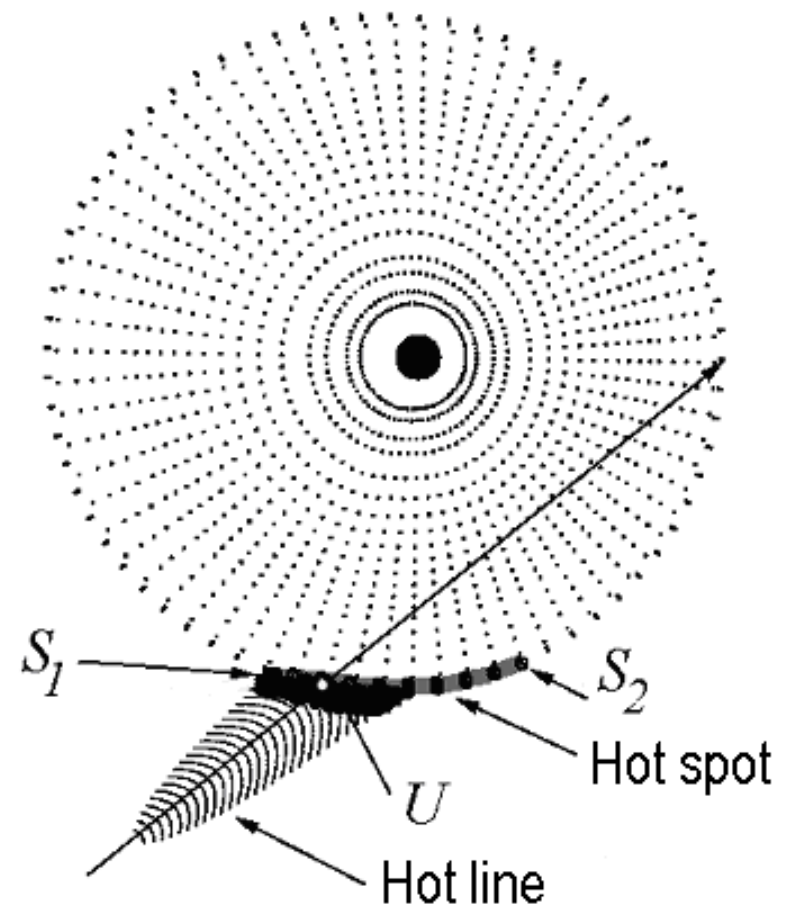
Источники излучения:

- 1) БК; 2) Аккреционный диск; 3) Вторичный эллипсоидальный компонент;
- 4) Горячая линия; 5) Горячее пятно

a



b



Parameter	JD 607	JD 746	
DISK			
e	0.028(16)	0.007(6)	
R_d/ξ	0.469(33)	0.420(16)	
	0.291(20)	0.267(11)	
$0.5\beta_d, ^\circ$	1.8(2)	0.9(1)	
$\alpha_e, ^\circ$	94(2)	94(65)	
α_g	0.359(5)	0.370(4)	
$\langle T_{in} \rangle, K$	22360(295)	23790(275)	
$\langle T_{out} \rangle, K$	7180(82)	6995(80)	
HOT SPOT			
R_{sp}/a_0	0.214(55)	0.053(45)	
T_U, K	12455(8)	4893(2)	
$0.5z_{sp}, ^\circ$	2.4(3)	1.2(4)	
HOT LINE			
a_v/a_0	0.041(1)	0.003(2)	
b_v/a_0	0.241(1)	0.551(52)	
c_v/a_0	0.009(1)	0.005(1)	
$\Delta T_{ww, \max}, K$	17755(120)	12000(1400)	
$\Delta T_{lw \max}, K$	17750(90)	11860(680)	

Фиксированные параметры:

$$1/q=4.027, i=82.64, R_{red}=0.275a_0,$$

$$T_{wd}=15660K, T_{red}=3730K, \xi/a_0=0.64,$$

$$R_{wd}=0.1252a_0,$$

$$1/q = M_{wd}/M_{red}$$

$a_0=1$, расстояние между компонентами
 ξ - расст. между ц.м. БК и L1

$0.5\beta_d$ - полутолщина внешн. края диска

a/a_0 – большая полуось диска

R_{sp}/a_0 – радиус горячего пятна

T_{in}, T_{out} – температуры внутренней и внешней
частей диска

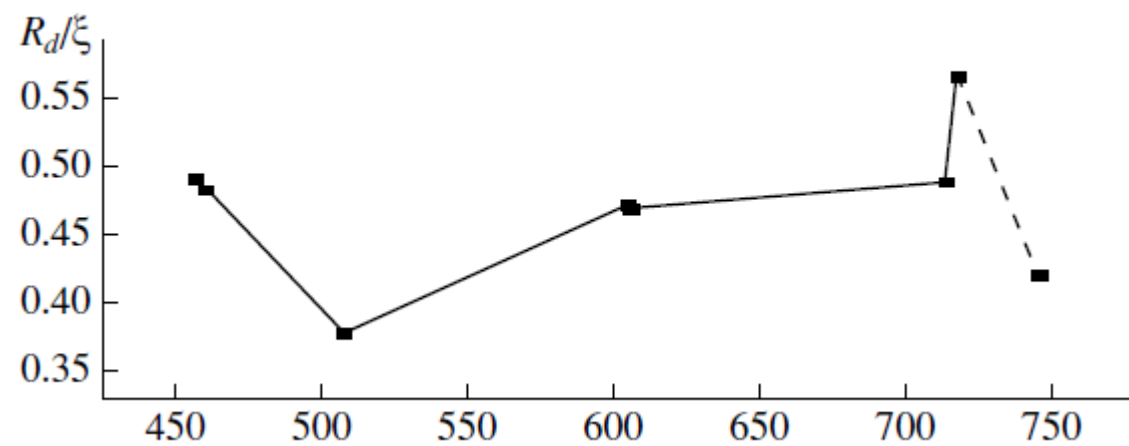
T_u – температура на оси струи

$0.5z_{sp}$ – полутолщина горячего пятна

β_1 – угол, который образует ось струи с

линией, соединяющей ц.м. комопонентов ТДС

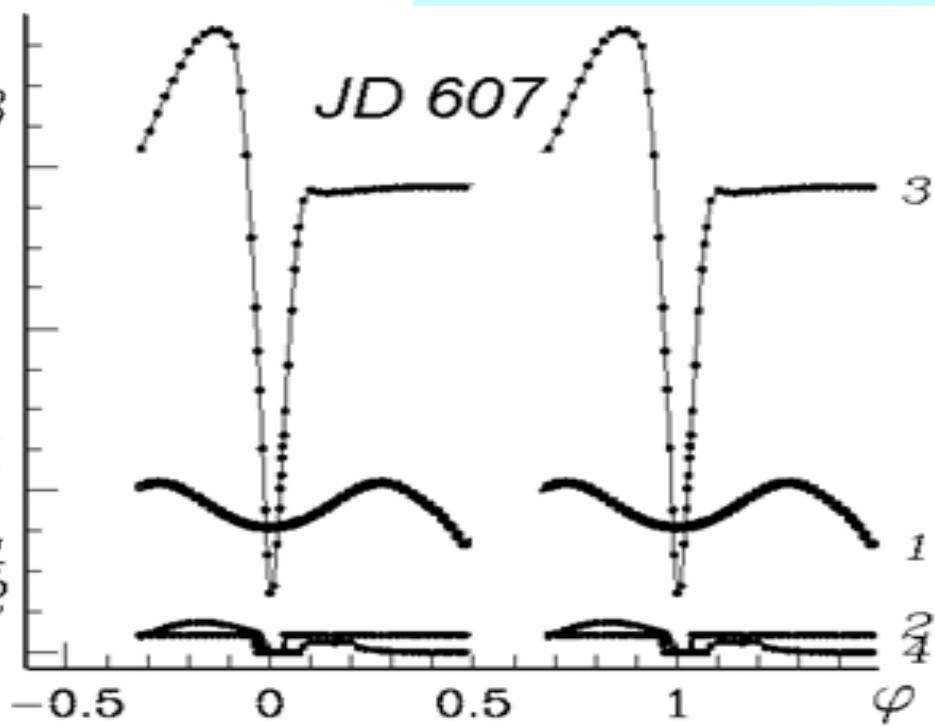
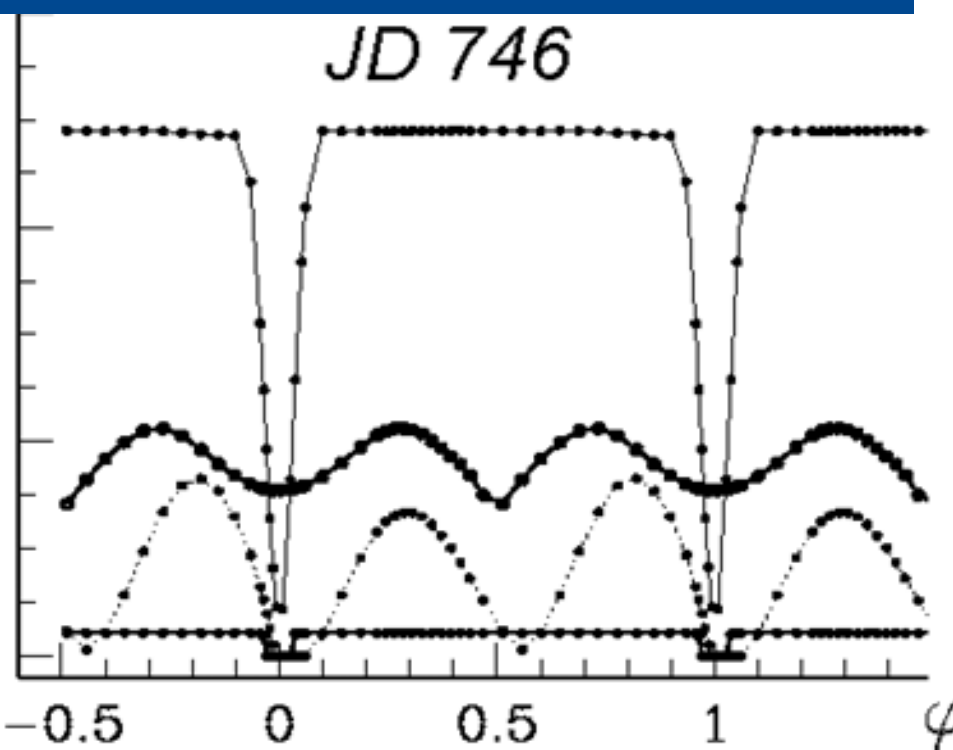
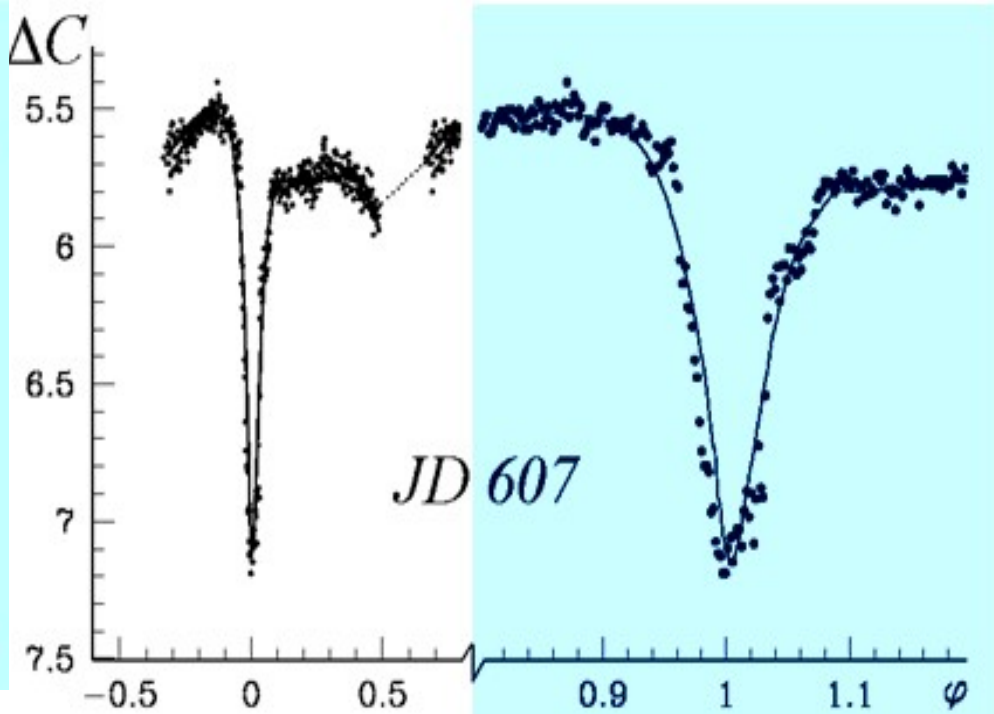
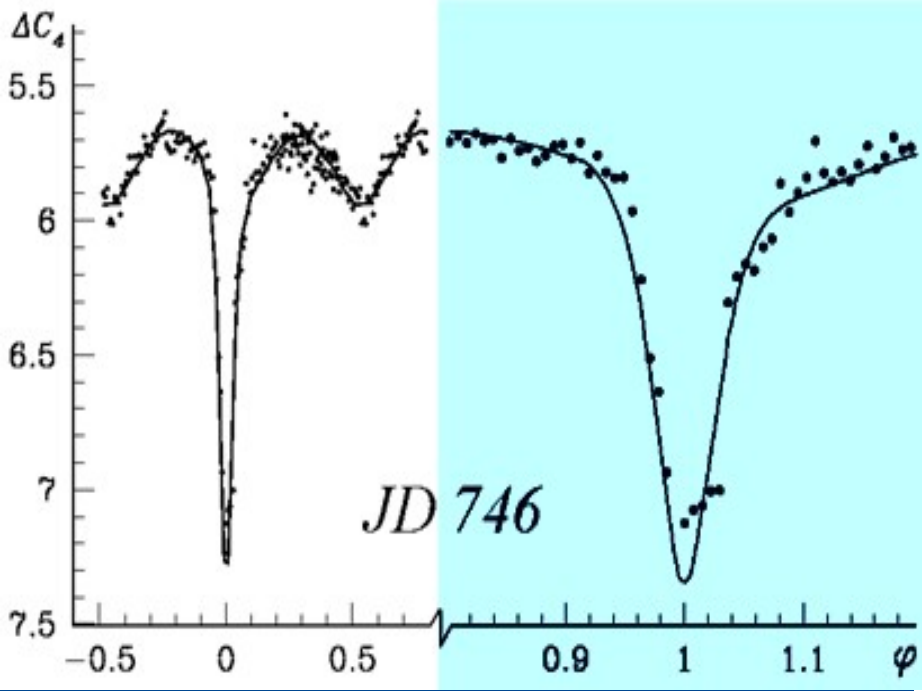
a_v, b_v, c_v – полуоси эллипсоида.



Зависимость
радиуса диска от
времени,
 $JD=2456000+$

На следующем слайде представлены наблюдаемые и теоретические кривые блеска, а также рассмотрен вклад в излучение от отдельных компонент ТДС:

- (1) -- красный карлик;
- (2) -- белый карлик;
- (3) -- аккреционный диск с горячим пятном;
- (4) -- горячая струя.



Анализ оптической переменности блеска UU Aqr – затменной новоподобной КП.

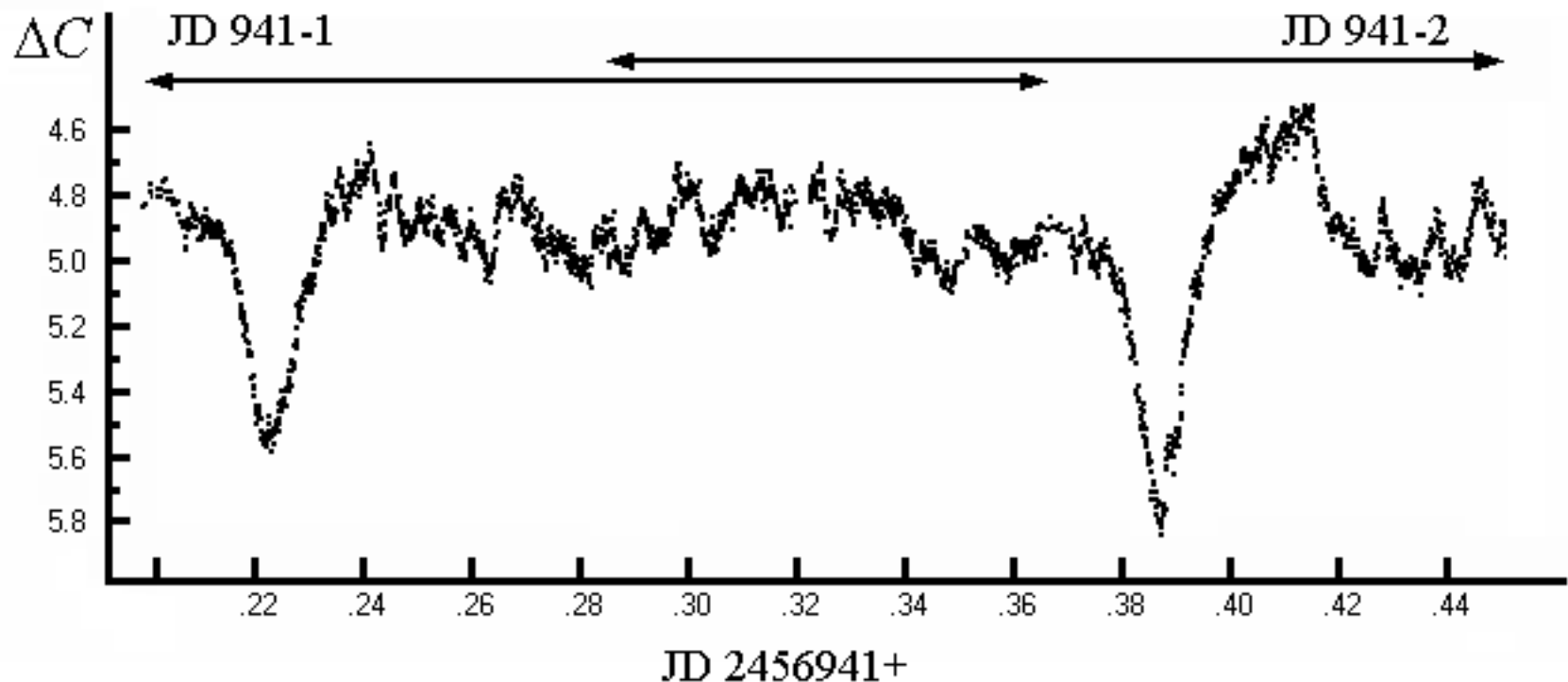
UU Aqr – яркая затменная КП ($V \sim 13.5m$) с орбитальным периодом 3.^h92. Как переменная звезда известна уже в течение 100 лет. В 1986 Волков и др. открыли глубокие затмения ($\Delta V \sim 1.5-2.0m$) и отнесли объект к классу катаклизмических переменных.

Baptista et al. (1994) уточнили эфемериды:

$$T_{\min} = \text{HJD } 2\ 446347.26657(4) + 0.163580429(5)E$$

и классифицировали звезду как новоподобную переменную.

Наблюдения. Для анализа мы использовали ПЗС-наблюдения UU Aqr, полученные нами 10-11 октября 2014 г. (JD 2 456 941.20–6 941.45, $\varphi \sim 0.865$ – 2.386 , $N = 2294$) в интегральном свете с шириной полосы пропускания $\Delta\lambda 0.5 \sim 4300$ – $8300 \text{ \AA}$. В течение наблюдательного сета зарегистрированы два различных по глубине затмения. Мы разделили оригинальную кривую блеска на две части с наложением их друг на друга (отмечены стрелками) и в дальнейшем анализировали каждую часть отдельно. Первая кривая блеска относится к фазам $\Delta\varphi = 0.8653882$ – 1.8796660 (1561 набл.) орбитального цикла, вторая – $\Delta\varphi = 1.3802408$ – 2.3861697 (1491 набл.), и участок $\Delta\varphi = 1.380$ – 1.880 – общий.



Моделирование UU Aqr. Относительно глубокие и широкие провалы на внезатменной части кривой блеска, т.н. дипы, не могут быть интерпретированы в рамках классической модели с гладкой поверхностью диска. Модель со спиральными рукавами на поверхности диска позволяет воспроизвести дипы (см. Хрузина, 2005, АЖ, 49, 783). Схематическое изображение аккреционного диска в картинной плоскости (вид сверху) и под углом 50° , рис. показывает структуру диска и спиральных рукавов. Используя метод Нелдера-Мида (Press, 1986) с набором фиксированных параметров (q , i , R_1 , T_1 , R_2 , T_2 , a_0) проведено решение обратной задачи и определены следующие

параметры ТДС:

$q=0.24$, $i=77.22$

$T_1=16050$ K, $T_2=3950$ K

$R_1/a_0=0.0095$, $R_2/a_0=0.273$

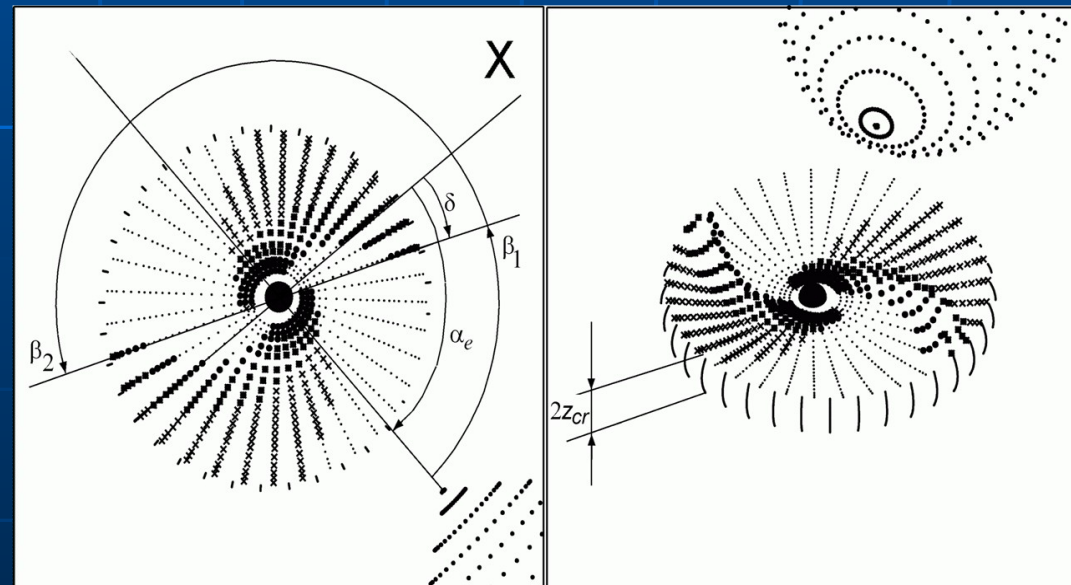
$R_d/a_0=0.27-0.33$

$e=0.063-0.067$

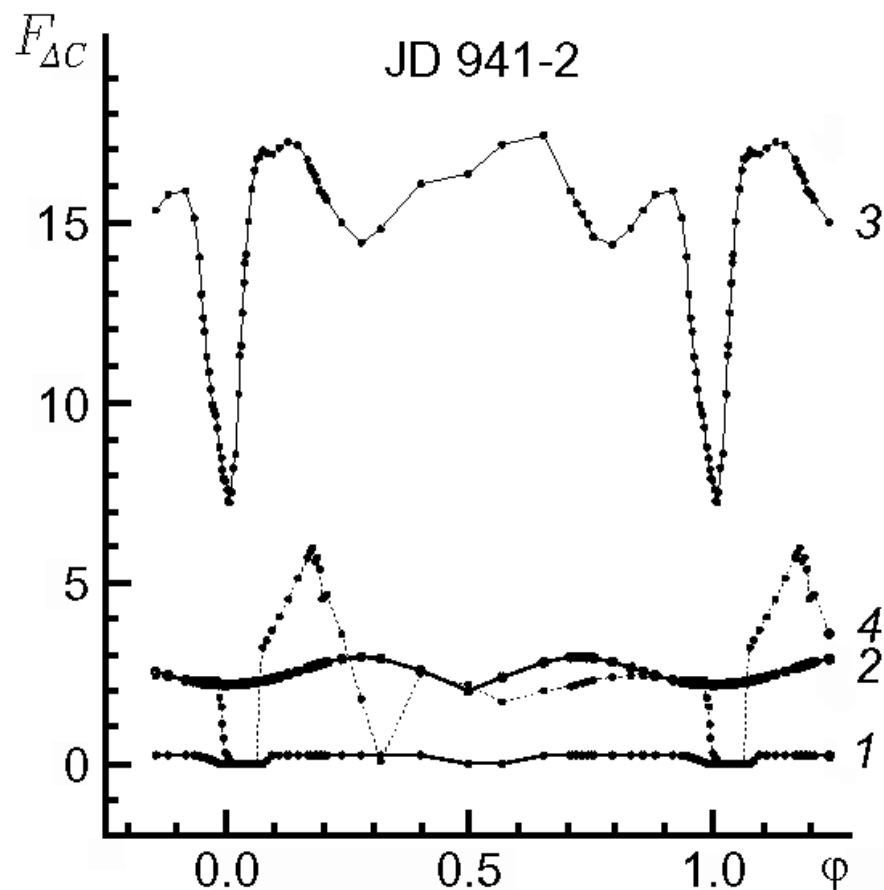
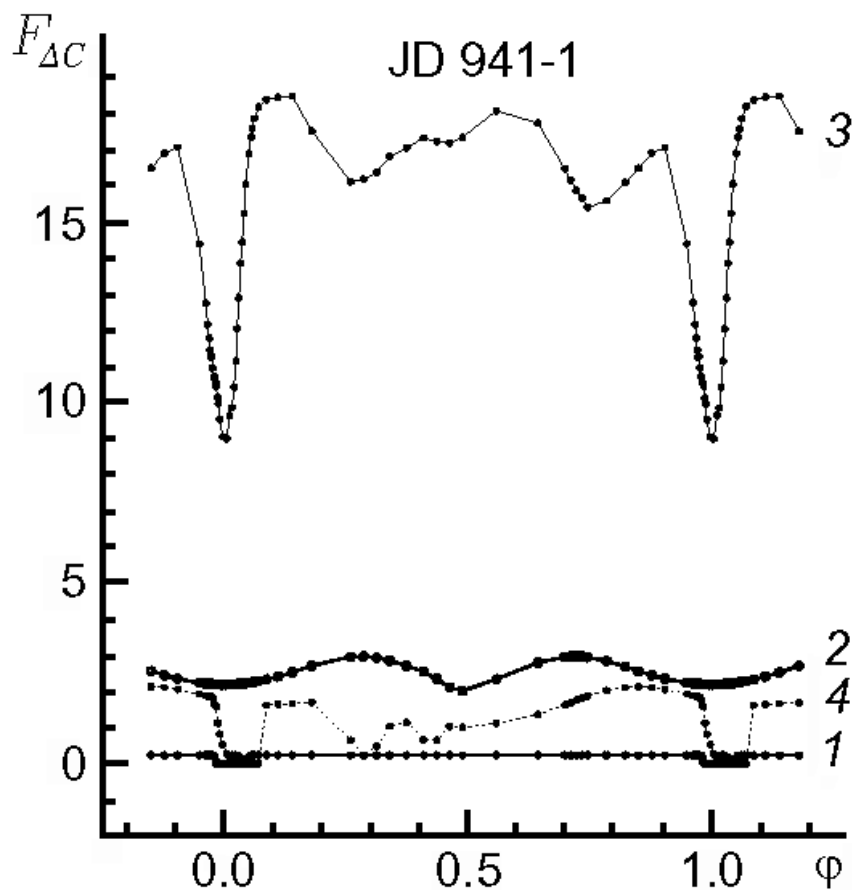
$T_{ww}=51370-57100$ (наветр. ст.)

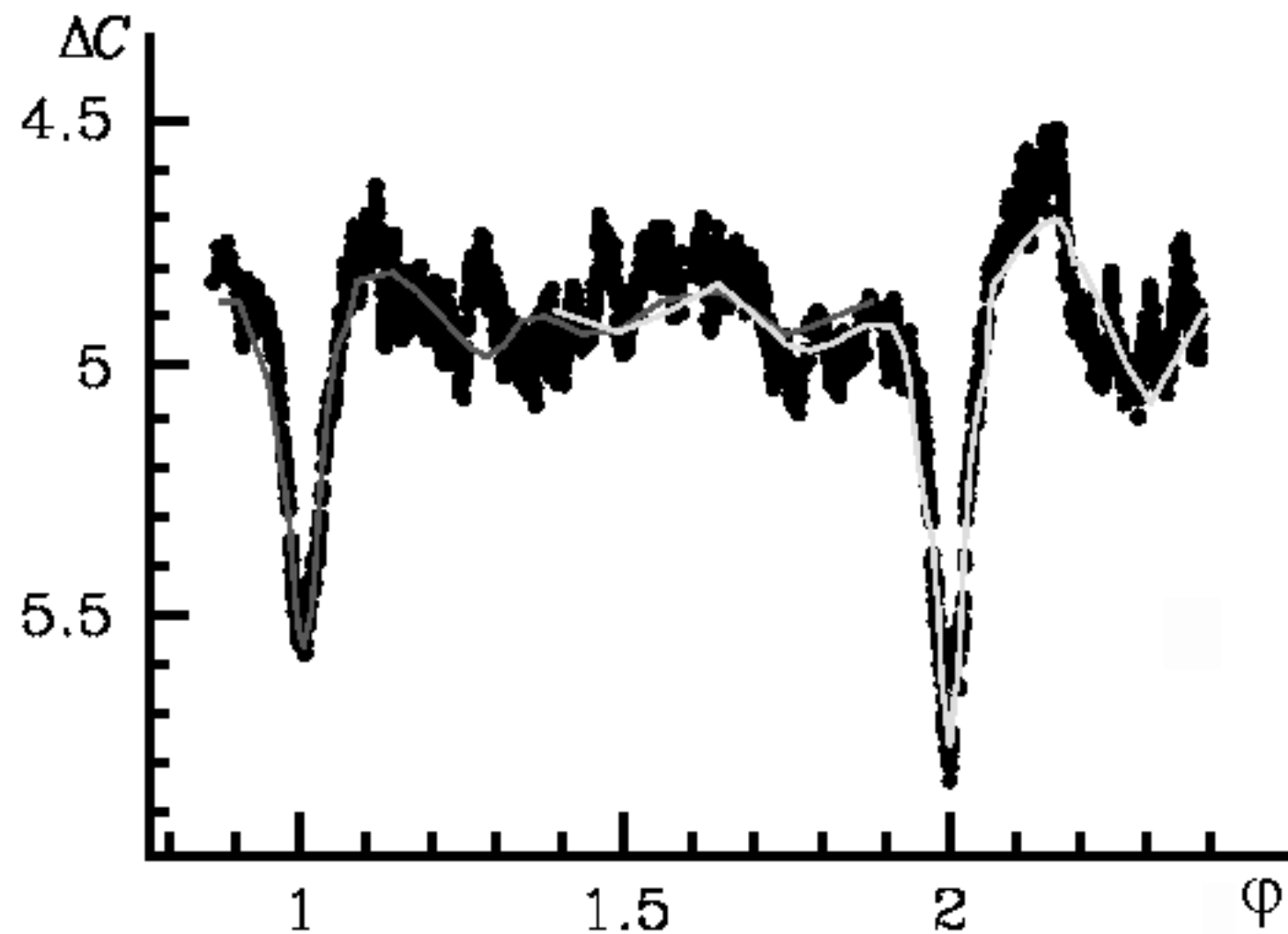
$T_{wl}=4710-7640$ (подветр. ст.)

$z=1.0-1.4^\circ$



Вклад компонентов UU Aqr в общую светимость системы:
белый карлик (1), красный карлик (2), аккреционный диск (3),
горячая линия (4).





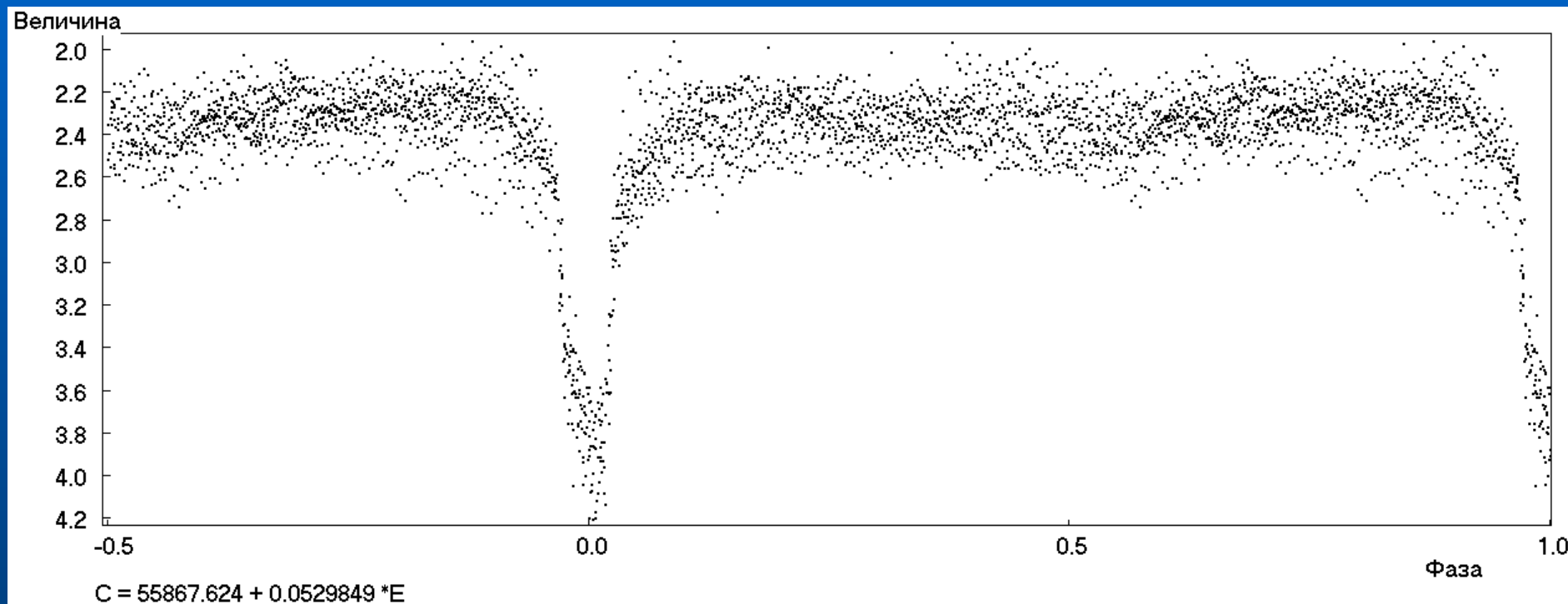
Сравнение
теоретических
кривых блеска
(серые и белые
сплошные линии) с
наблюдаемыми
(черные точки).

Теоретические
кривые блеска
удовлетворительно
воспроизводят
наблюдаемые.

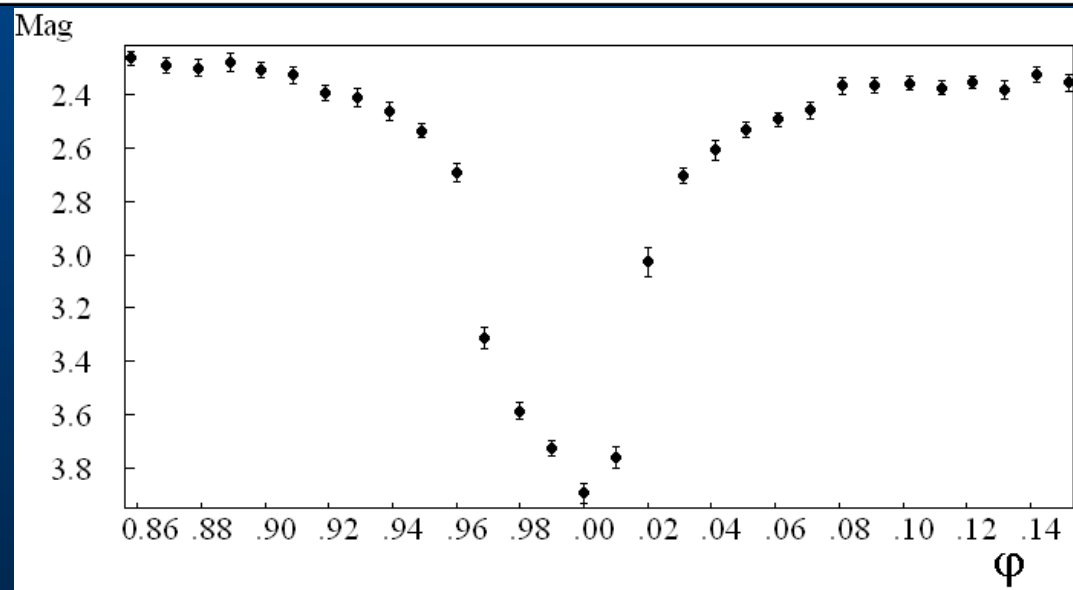
KN Cet

Карликовая новая KN Cet была открыта Уиллсом (Wils et al., 2009), они же обнаружили вспышку звезды, произошедшую в 2005 г. с амплитудой ~ 2 mag, нашли орбитальный период в 76.3 мин.

Мы уточнили эфемериду: $\text{Min(hel)} = 2455867.62398 + 0.052984896 * E$.



- За период 2013-2016 гг. получено около 2.3 тыс. ПЗС-наблюдений в белом свете с короткими экспозициями в 20-30 с.
- Ассиметричная кривая блеска, минимум наступает чуть позже момента соединения вторичного компонента и белого карлика.
- Глубина затмений составляет ~ 1.5 mag, отсутствие предзатменного горба.

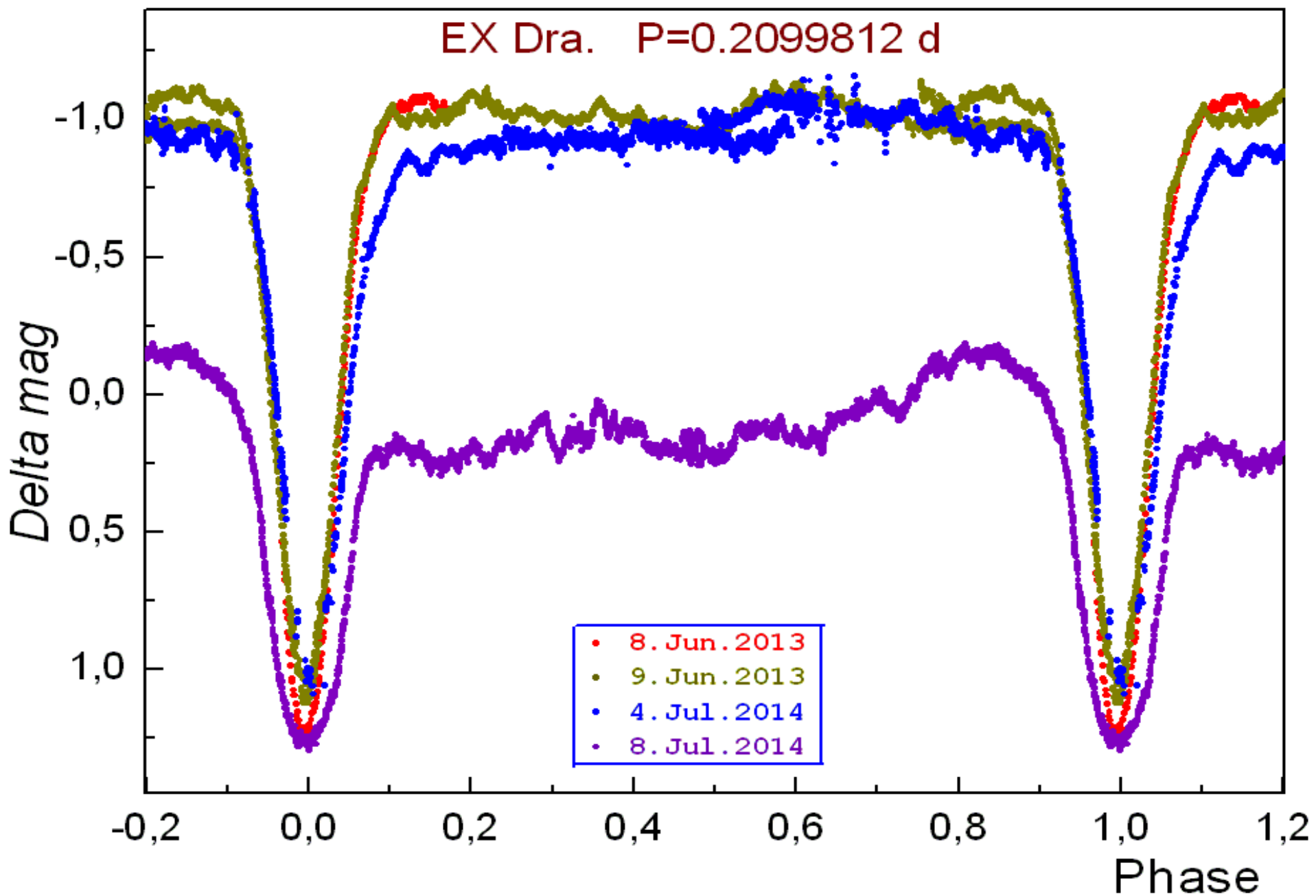


Изменение орбитальных кривых блеска у карликовых новых **EX Dra** и **V2051 Oph** (по наблюдениям 2013 -2014 гг.).

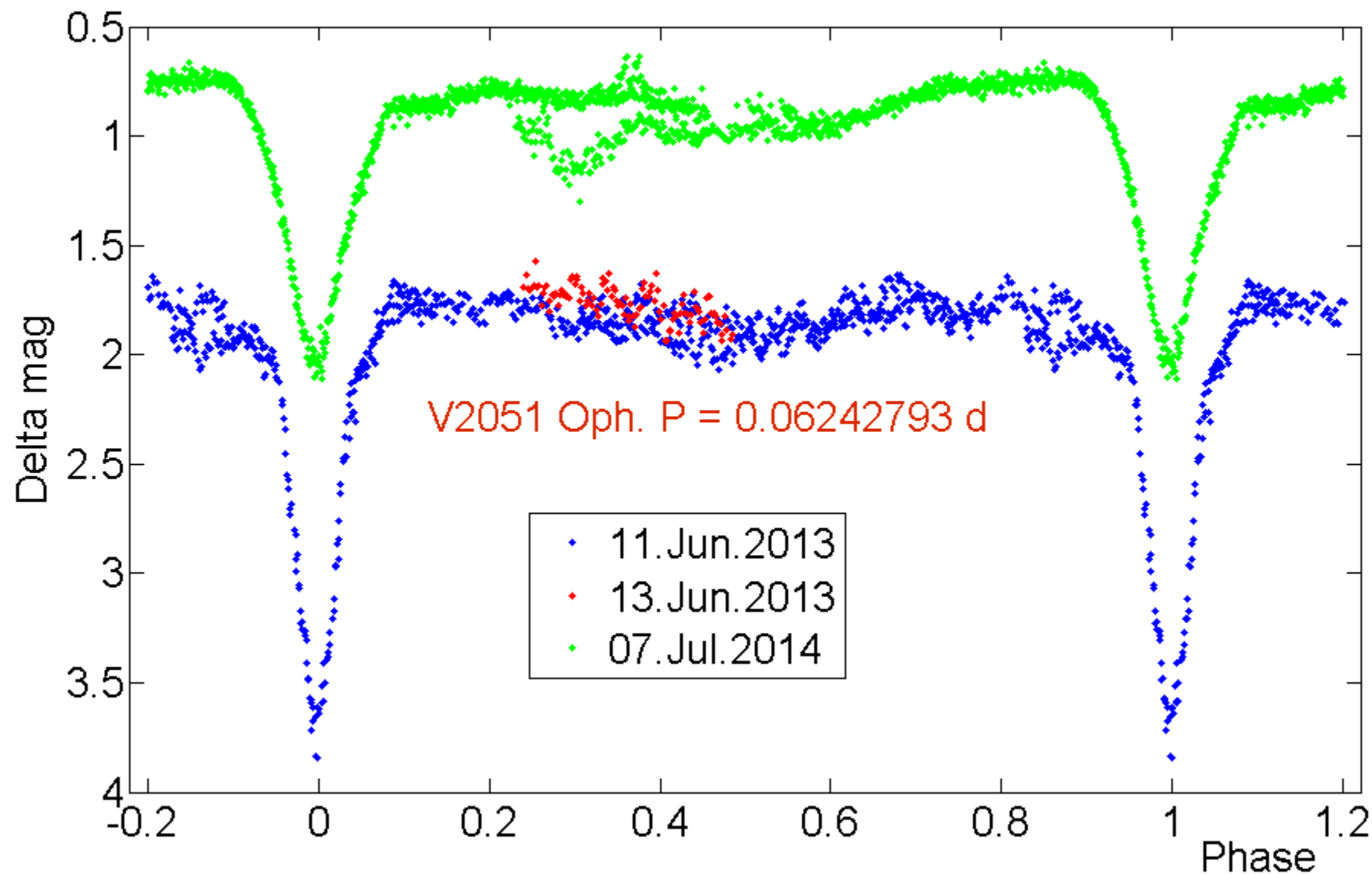
Интересной особенностью этих систем оказались не только заметные вариации формы и глубины затмений, но также изменения внезатменного уровня блеска на ~ 1 mag.

Фазовые кривые блеска этих объектов будут показаны на следующих слайдах. Можно видеть, что уровень блеска вне затмений меняется от ночи к ночи, что может быть вызвано изменениями светимости диска и других источников излучения.

Фазовые кривые блеска EX Dra в течение 4-х ночей



Фазовые кривые блеска V2051 Oph в течение 3-х ночей.



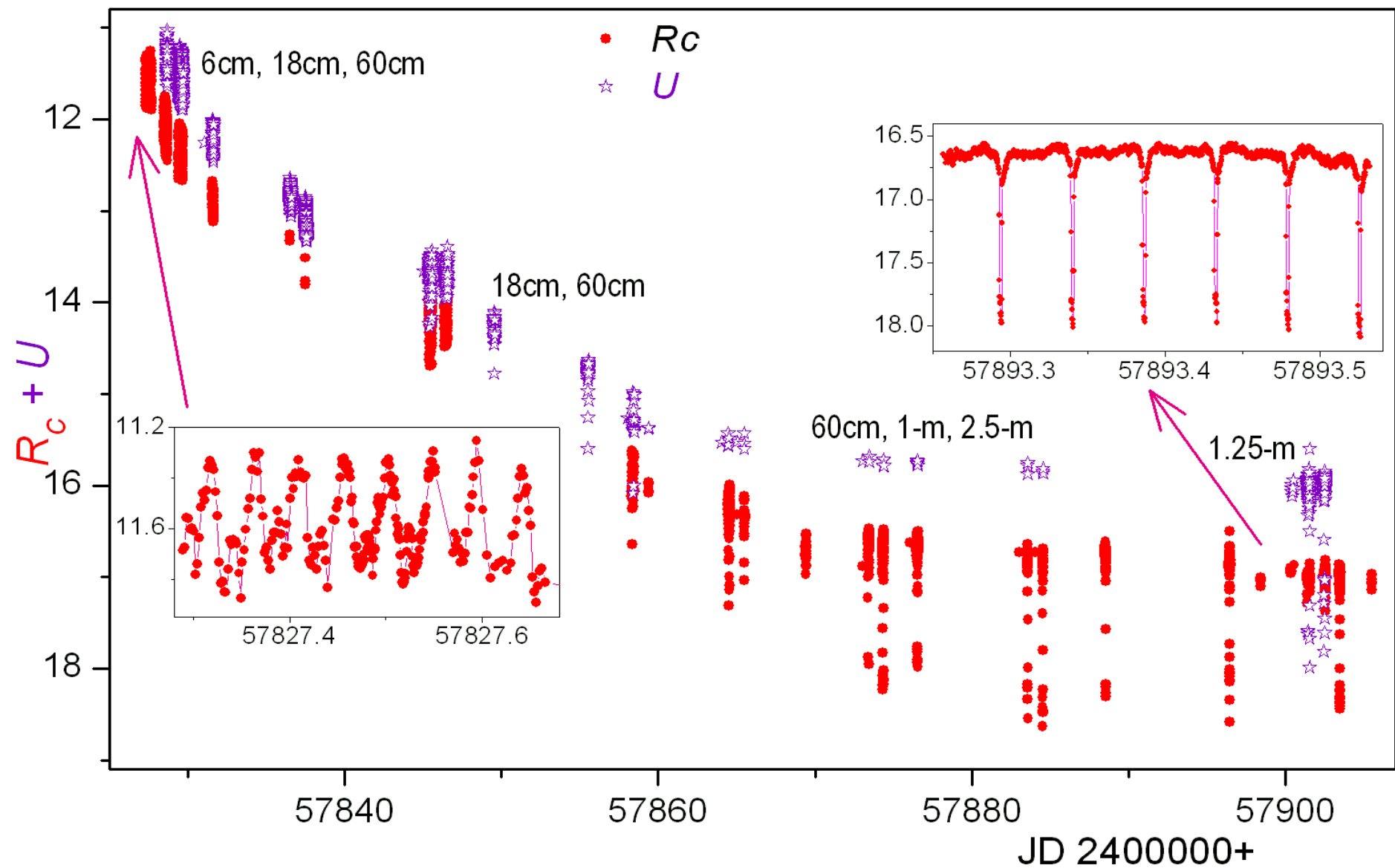
Карликовые новые типа SU UMa во время вспышек

Многоцветная фотометрия затменной системы OV Boo

OV Boo (SDSS J150722.30+523039.8) была открыта Szkody et al. в 2005 г., авторы наблюдали глубокие затмения звезды, определили орбитальный период в 67 мин. По спектральным наблюдениям звезда относилась к типу WZ Sge. По архивным фотопластинкам были найдены две вспышки звезды, произошедшие в 1906 и 1984 гг.

В марте 2017 г. произошла вспышка амплитудой 6 mag, и мы начали *UBVRI* наблюдения OV Boo и продолжали их до мая, когда звезда вернулась в спокойное состояние. Важной особенностью оказалось отсутствие глубоких затмений, столь характерных для этой звезды в спокойном состоянии.

На следующем слайде показана сводная кривая блеска во время вспышки.

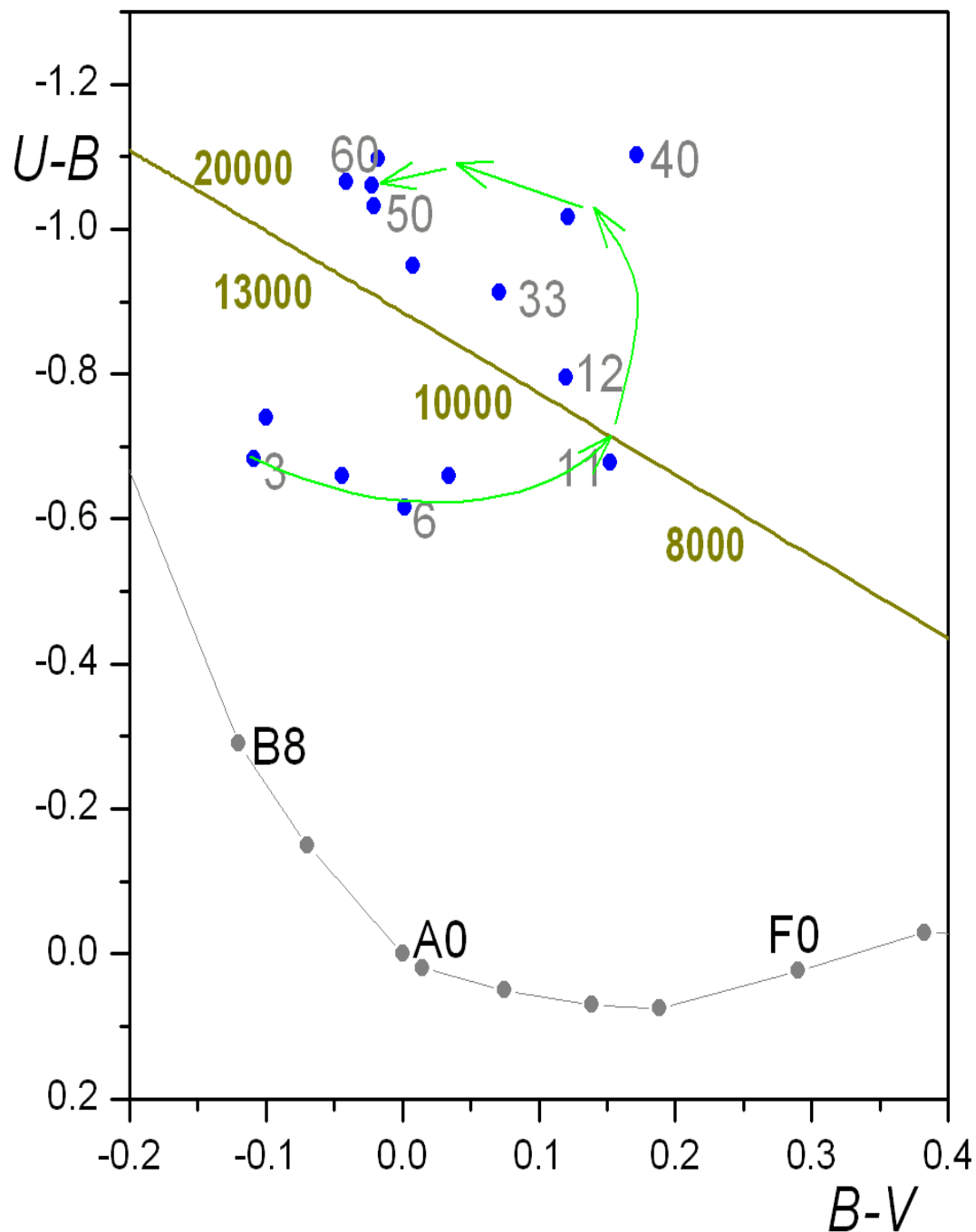


Цветовые изменения OV Boo в течение вспышки

На диаграмме стрелочками
показан трек звезды,
отмечено число дней,
прошедших после
максимума вспышки.

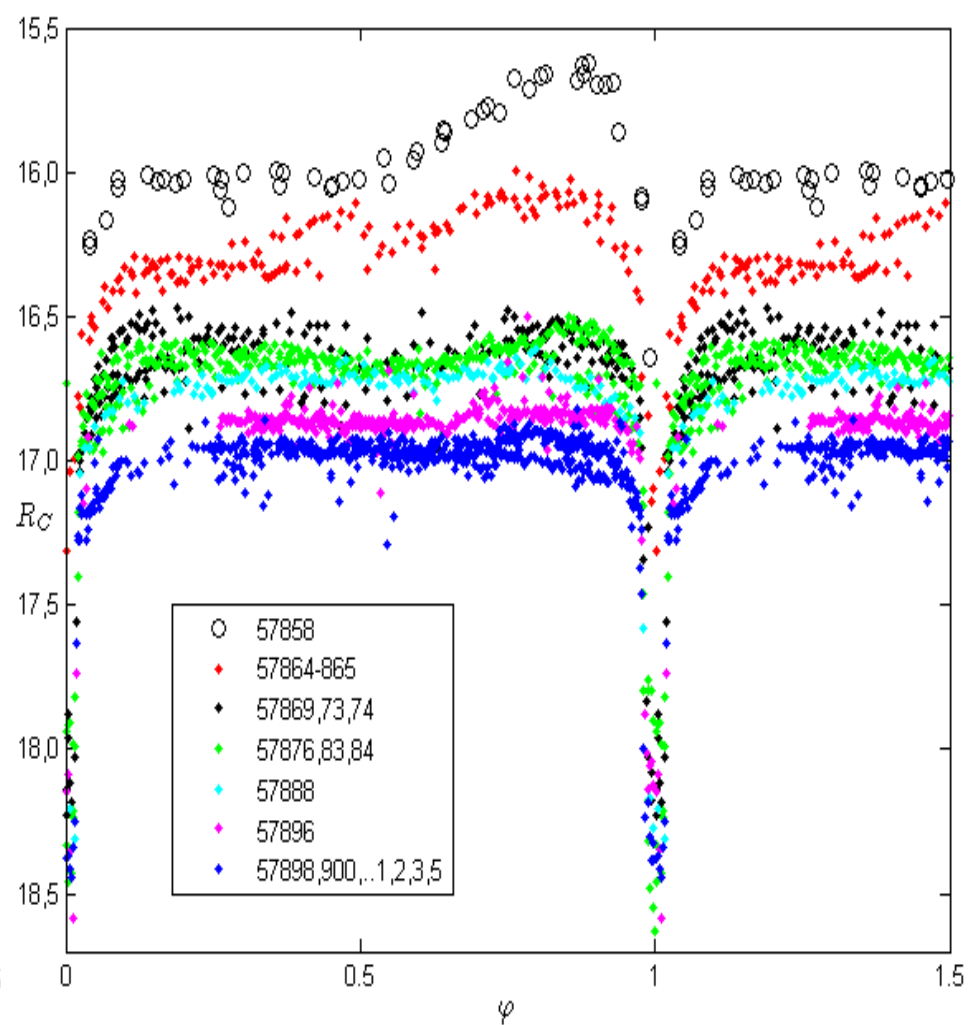
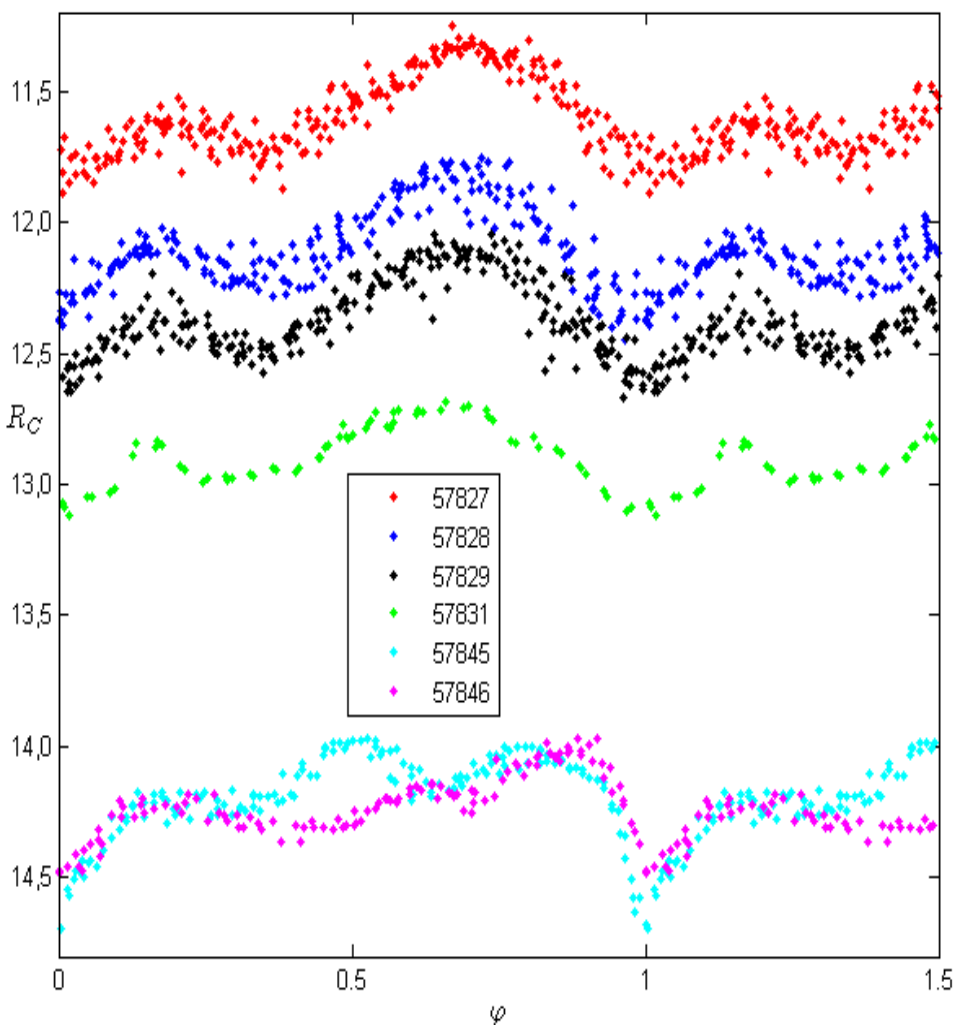
Зеленая линия представляет
линию черного тела, линия
звезд главной
последовательности отмечена
серым.

Видно увеличение УФ избытка
по мере ослабления блеска
системы. Цветовая
температура после вспышки
достигла ~ 13000 К.

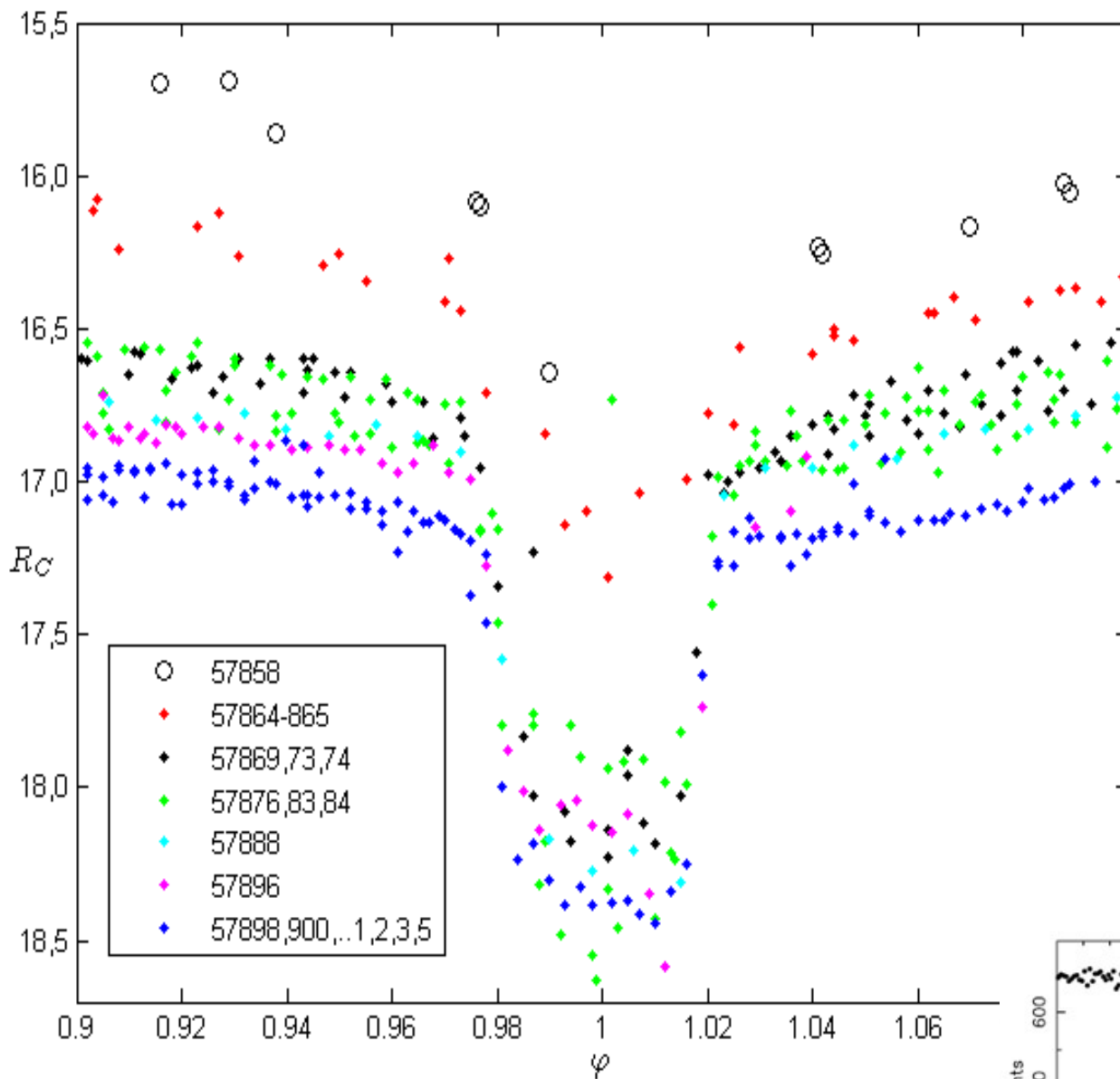


Нами были определены следующие эфемериды:

$$JD \text{ max hel} = 2357901.5299 + 0.04625834 * E.$$

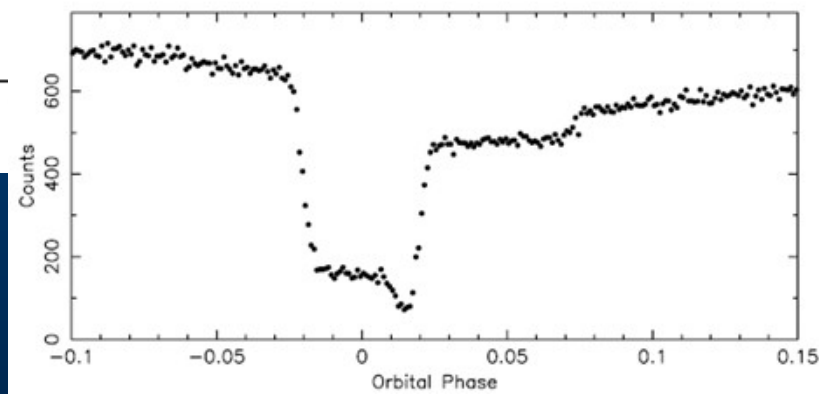


Слева: кривые блеска в течение первых 20 дней после максимума;
Справа – кривые блеска спустя месяц после максимума. R_C полоса.

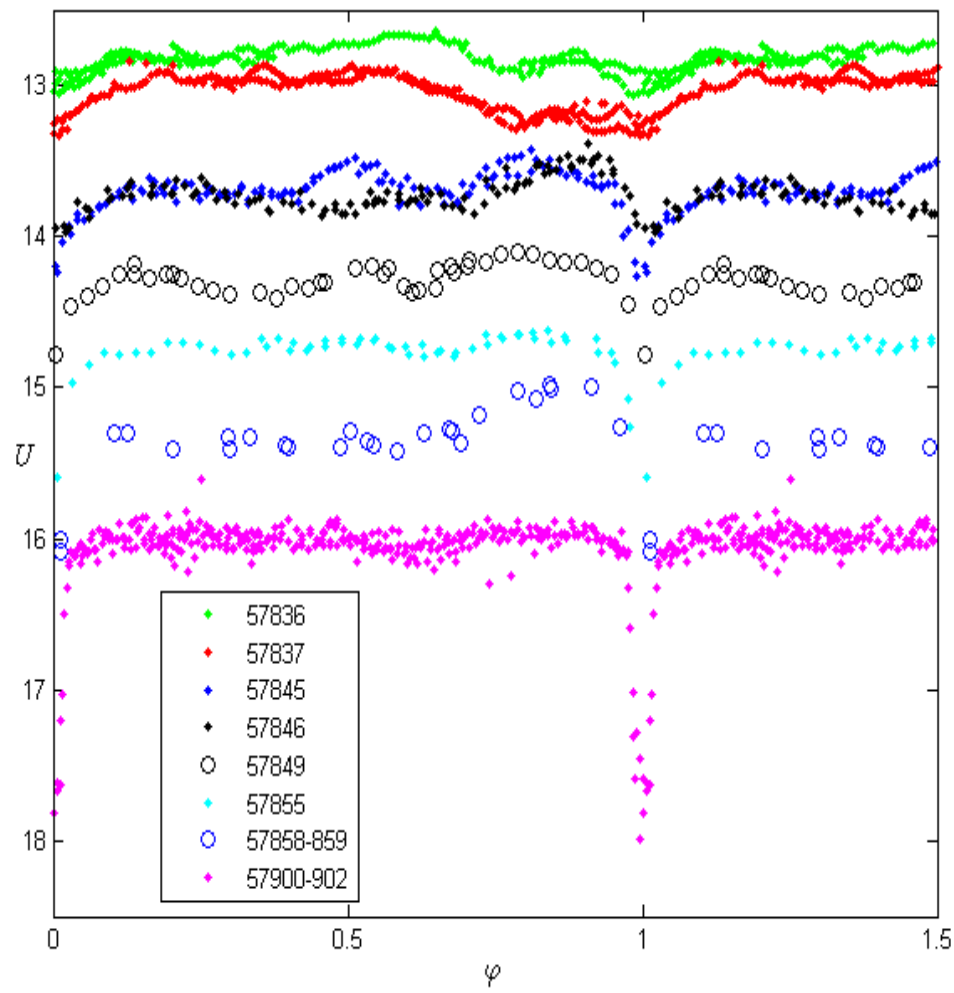
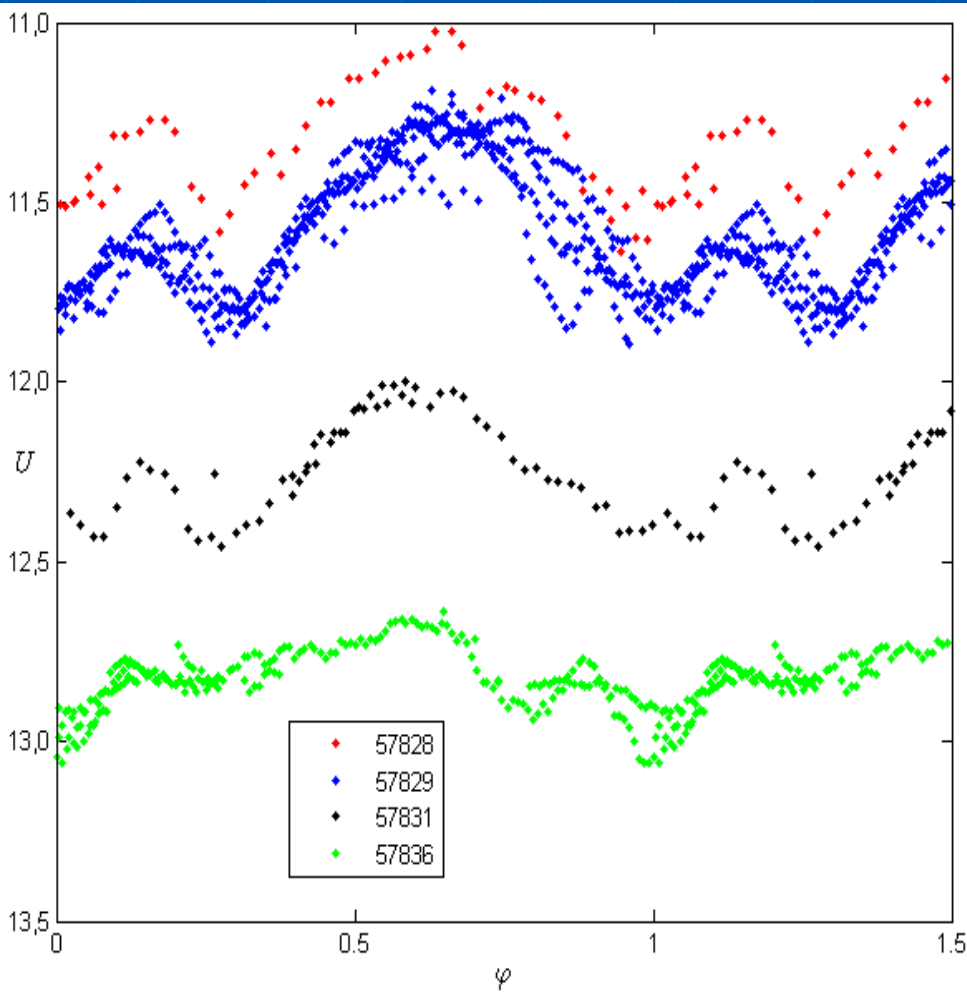


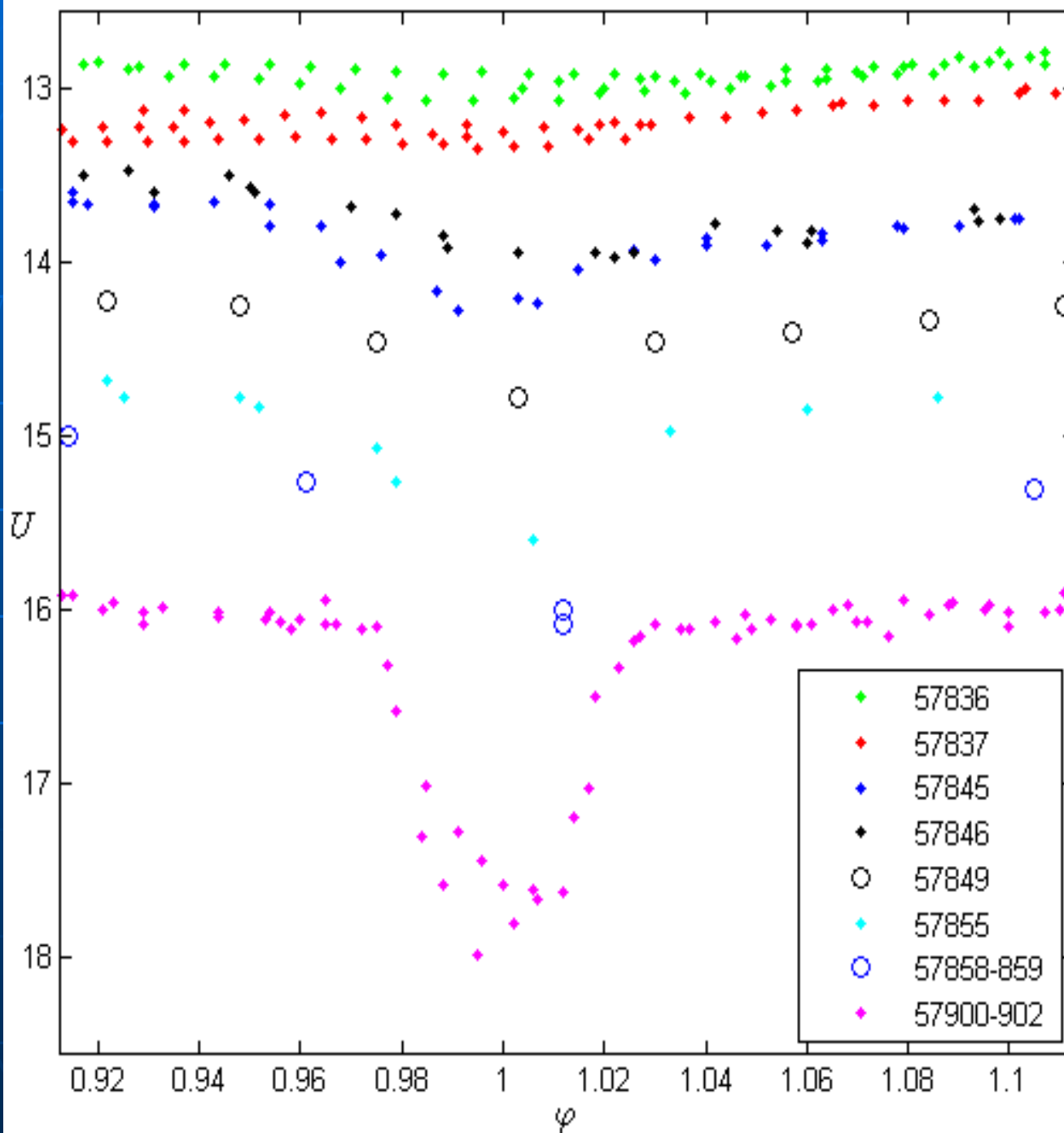
Фрагмент затмений в R_C полосе. Видно постепенное увеличение глубины затмения со временем, произошедшим после вспышки. Видно, что дно затмения не является плоским.

Профиль затмений OV Boo из статьи Patterson et al., 2008.



Фазовые кривые блеска в U полосе. Слева: в течение вспышки доминирует двойная орбитальная волна с амплитудой в 0.5 mag. Затмения слабые. Справа: видно появление четких затмений с ослаблением блеска системы.

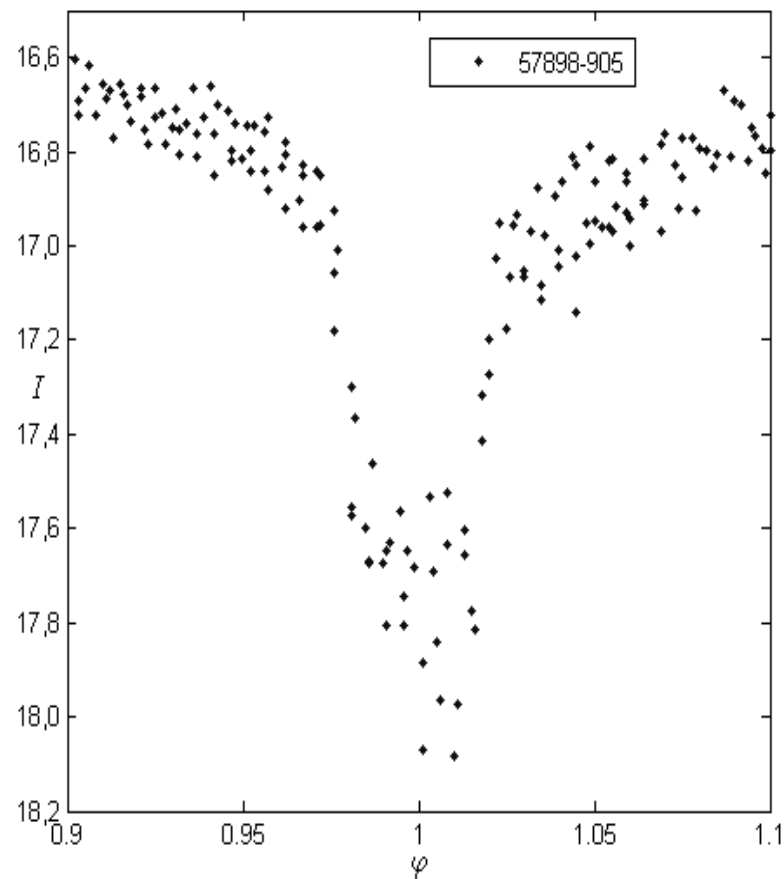
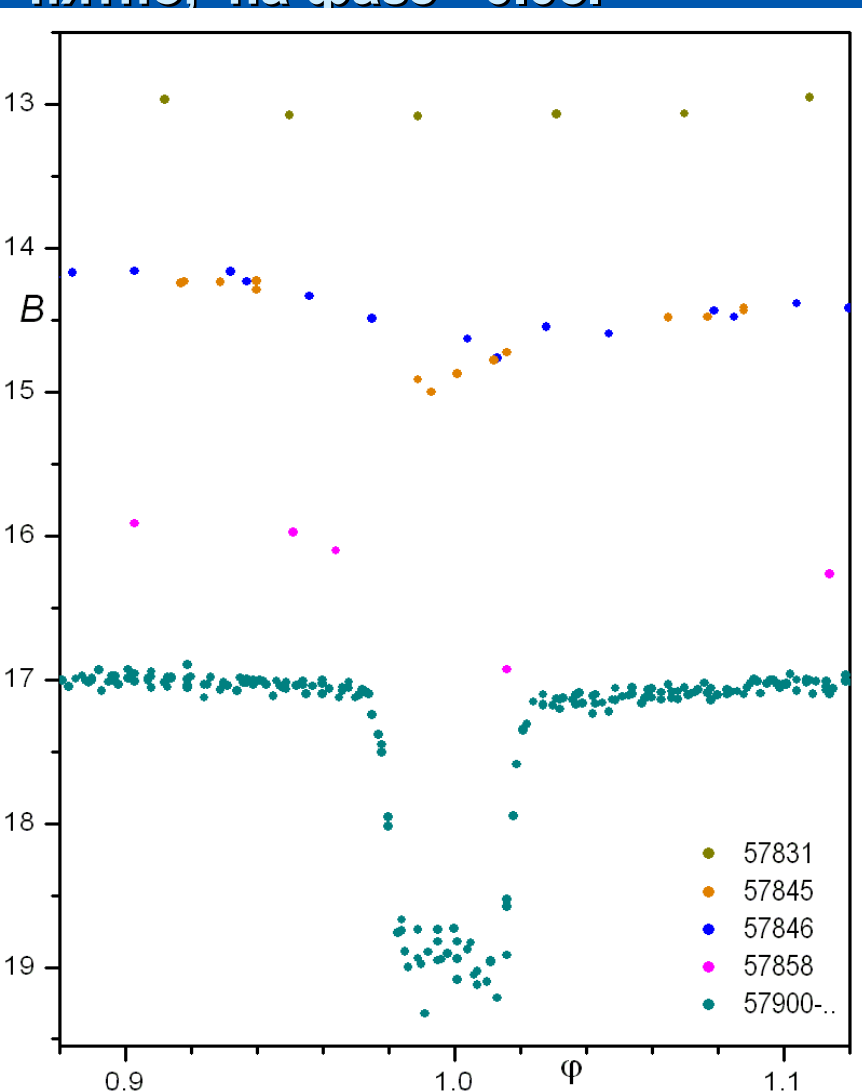




Фрагмент
затмений в U
полосе.

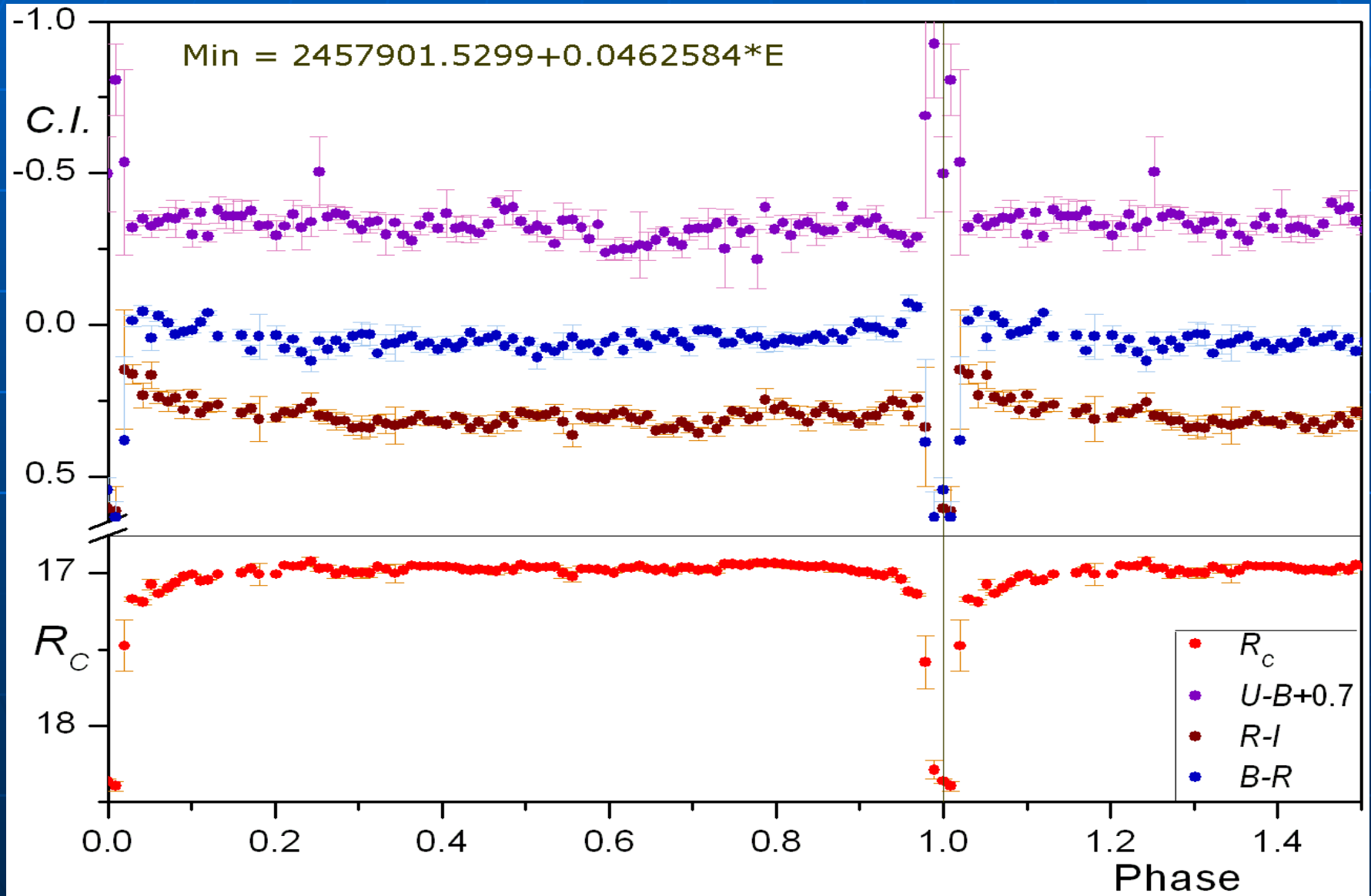
Когда звезда
вернулась в
спокойное
состояние,
появляется
четкая форма
затмения.

На примере кривой блеска в полосе *B* можно видеть, что после входа в затмение БК, от наблюдателя закрывается горячее пятно, на фазе ~ 0.05 .



В полосе *I* наиболее явно видны «покатые» плечи профиля затмений – длительность затмения диска больше, чем в УФ.

Изменение показателя цвета в течение орбитального вращения системы. В течение затмений показатели цвета $B-R$ и $R-I$ краснеют, но в это же время наблюдается УФ избыток для $U-B$.



Карликовые новые типа WZ Sge

Звезды типа WZ Sge имеют наиболее короткие среди карликовых новых орбитальные периоды (около 80-90 min), и характеризуются долгим временем повторения вспышек (десятки лет) и большими амплитудами вспышек $\sim 8^m$. В течение супервспышек наблюдаются суперхампы, разделяемые на ранние, средние и поздние. Некоторые из них показывают сложное поведение после супервспышек, характеризующееся повышением яркости (т.н. rebrightening).

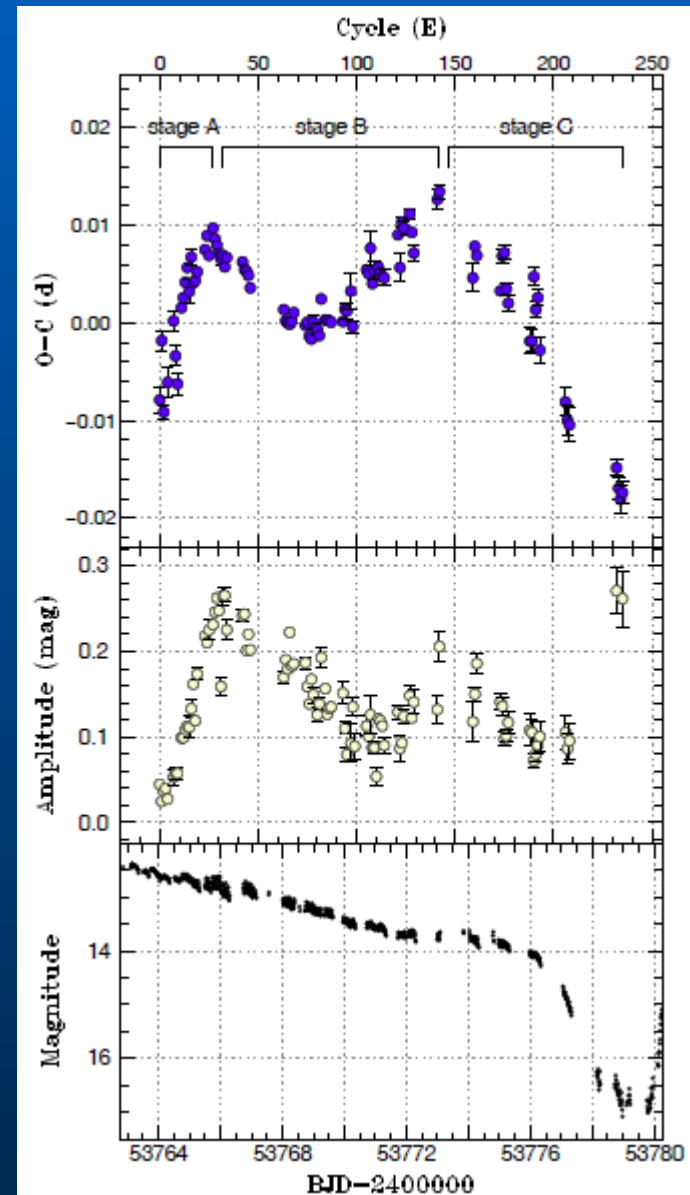
Одной из наиболее характерных черт звезд типа WZ Sge является наличие ранних суперхампов, не наблюдаемых у других типов карликовых новых. Они появляются во время максимума сверхвспышки и имеют периоды, совпадающие с орбитальными.

Осаки и Мейер (2002, *Astron. Astrophys.* 383, 574) предположили, что существование двойной волны ранних суперхампов связано с резонансом 2:1 приливного аккреционного диска у систем с экстремально низким темпом аккреции и могут быть объяснены наличием спиральной структуры диска с 2-мя спиральными рукавами, Lin and Papaloizou (1979, *MNRAS*. 186, 799).

Затем ранние суперхампы сменяются обычными. В это время мы видим одну волну за период и наибольшую амплитуду. Период обычных суперхампов как правило на несколько процентов длиннее орбитального.

Обычные суперхампы объясняются моделью приливной и тепловой неустойчивости диска (Osaki, 1989, PASJ, 41, 1005; Whitehurst, 1988, MNRAS, 232, 35). Наличие приливного резонанса 3:1 в диске (радиус которого меньше радиуса, возникающего при резонансе 2:1) формирует вытянутый диск, прецессирующий с периодом больше орбитального. Биение прецессионного и орбитального периодов вызывает периодические изменения блеска, идентифицируемые как суперхампы.

Эволюция обычных суперхампов, рис. из работы Kimura et al., 2016



Окончательная стадия супервспышки характеризуется поздними суперхампами с меньшей амплитудой и более длинным периодом. Они формируются спустя несколько дней после быстрого спада после плато на кривой блеска и могут продолжаться еще в течение нескольких сотен оборотов двойной системы спустя супервспышки.

Согласно Като и др. (2008, PASJ, 60, L23), поздние суперхампы образуются в прецессирующем аккреционном диске вблизи области границы приливного взаимодействия. Эксцентрический диск медленно расширяется в течение спада после супервспышки, в конце концов достигая границу действия приливных сил, что приводит к стабилизации периода.

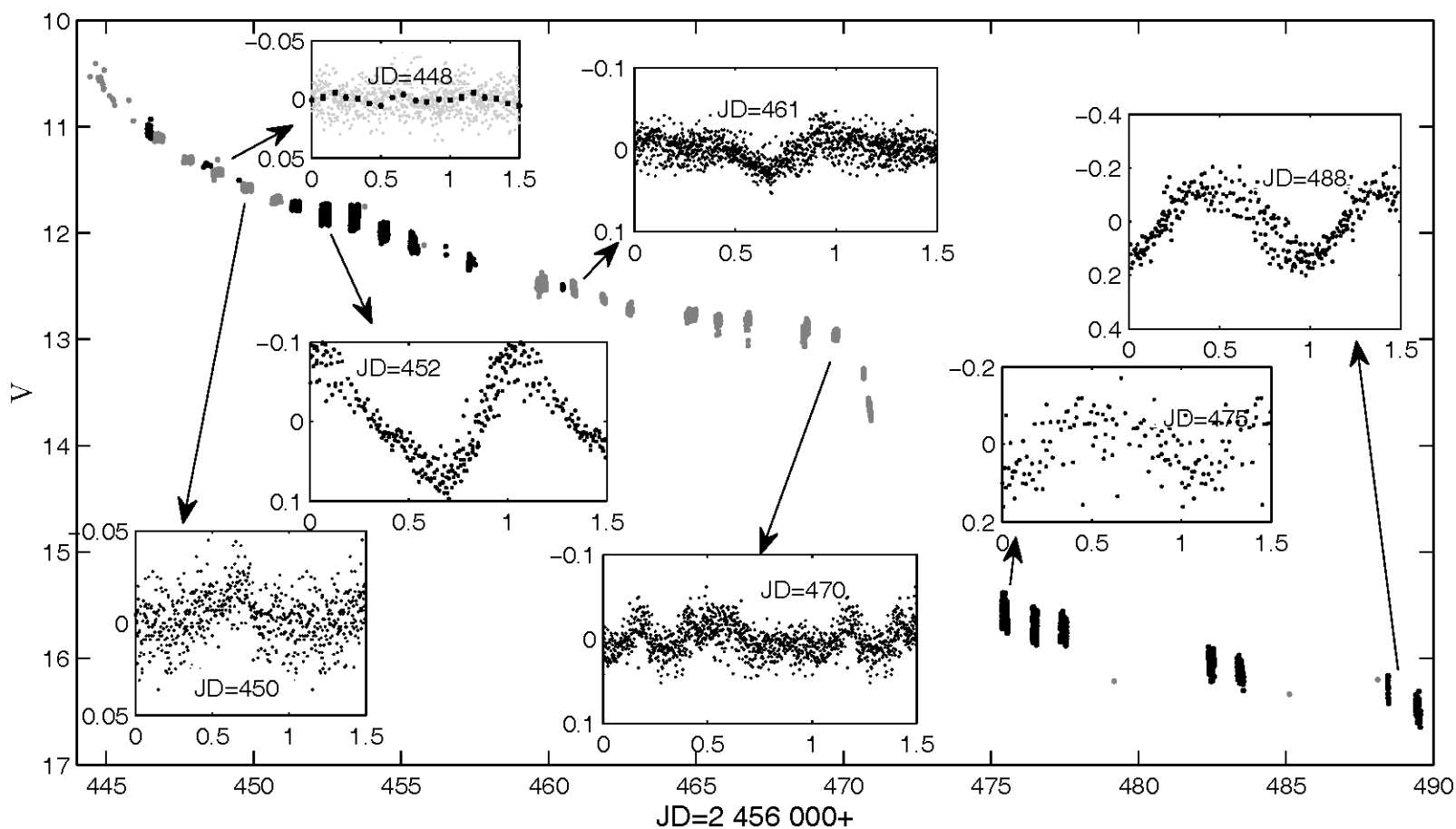
Известно около нескольких сотен объектов типа WZ Sge, и их исследования очень важно для понимания физики процессов ТДС.

Объект PNV J19150199+0719471 = V1838 Aql

был открыт К. Итаками 31 мая 2013 г. В максимуме вспышки блеск звезды составил 10 mag. В спокойном состоянии блеск звезды был ~19 mag.

Мы начали наблюдения звезды 2 июня 2013 г. Наблюдения проводились на телескопах Словацкой АН и в Крымской лаборатории ГАИШ. Нами было получено ~4000 ПЗС-наблюдений в лучах *UBVRcIc*. Большинство из них были получены в лучах *V* (~2000 кадров) и *Rc* (~1000 кадров). В обеих обсерваториях наблюдения проводились на небольших 50-60 см телескопах.

На внутренних графиках представлены кр. бл. за отдельные ночи. Спустя несколько дней после вспышки видны неперіодические изменения блеска. На 3-м графике видна переменность блеска с ампл. 0.2^m , связанная с наличием суперхампов. На следующих графиках можно видеть уменьшение амплитуды. Во время спада мы не можем видеть периодических изменений блеска, однако после спада переменность связанная с наличием суперхампов появляется вновь и даже с большей амплитудой ($\sim 0.3^m$), чем ранее.



Проанализировав наблюдения, где присутствуют обычные и поздние суперхампы, мы определили средние эфемериды суперхампов:

$$JD_{MAX} = 2456445.220 + 0.058221 * E,$$

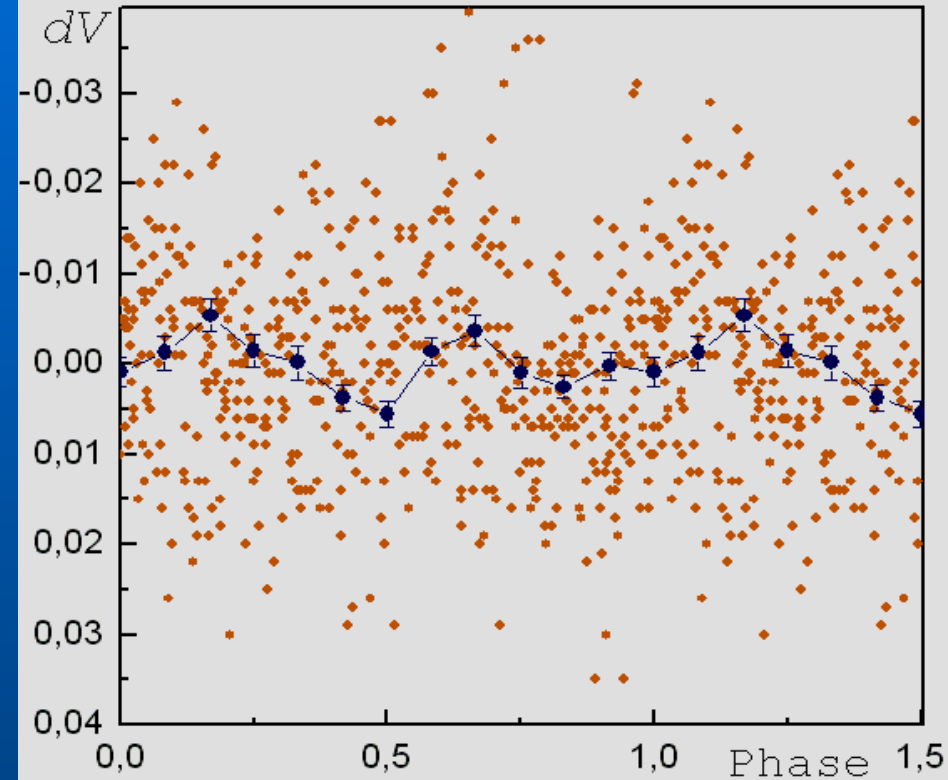
Мы также нашли их О-С уклонения. Диаграмма О-С (будет представлена ниже) показала изменение периода суперхампов в промежуток времени от начала образования обычных суперхампов до формирования поздних суперхампов.

Ранние суперхампы
показывают двойную
волну за период

$$P_{\text{ear}} = 0.0573 \text{ d.}$$

Для звезд типа WZ Sge

$$P_{\text{orb}} \sim P_{\text{ear}}.$$

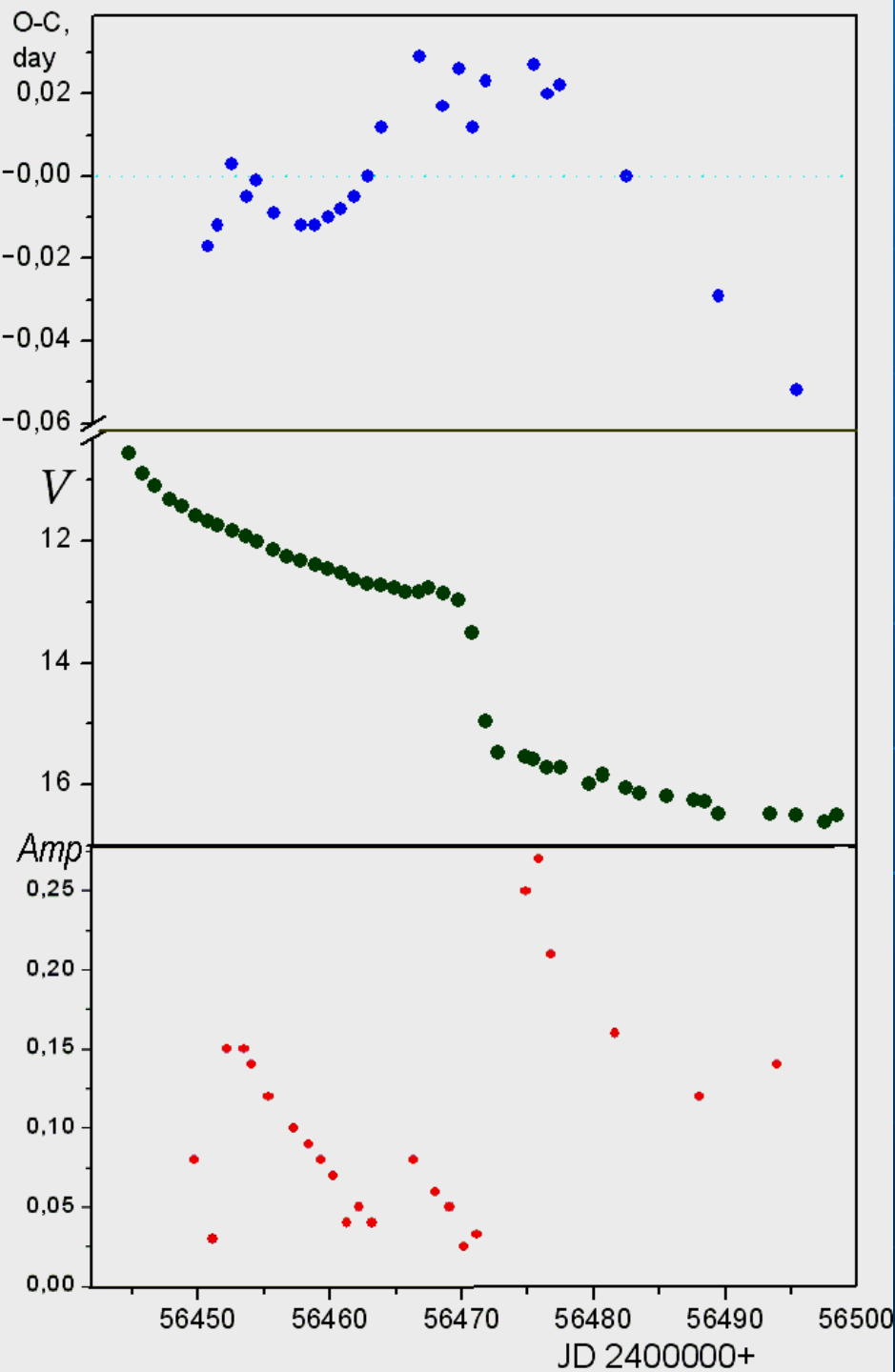


Тогда, $\varepsilon = 1 - P_{\text{orb}}/P_{\text{sh}} = 0.015$.

Это значение типично для звезд типа WZ Sge
и SU UMa.

По фор-ле $\varepsilon = 0.16(2)q + 0.25(7)q^2$ Kato, 2009, Publ.

Astron. Soc. Jap. 61, S395



Зависимость значений O-C,
V mag и амплитуды
суперхампов от времени.

Видно, что происходит
увеличение амплитуды
суперхампов до 0.15^m во
время перехода от
состояния А к В и до 0.25^m
при переходе от быстрого
падения блеска к плавному
спаду.

Изменение периода в течение супервспышки:

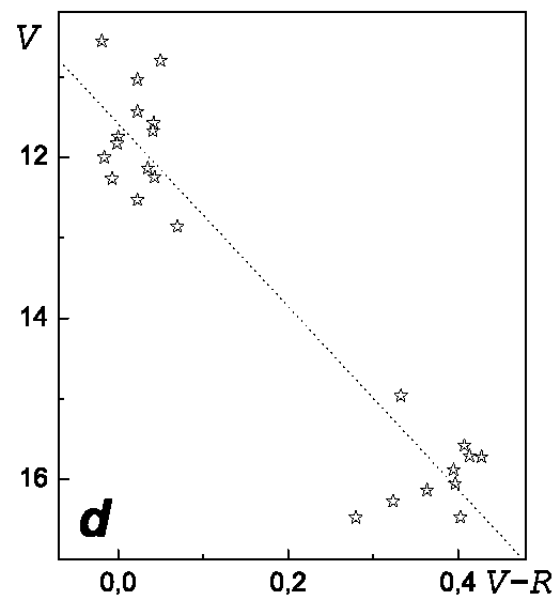
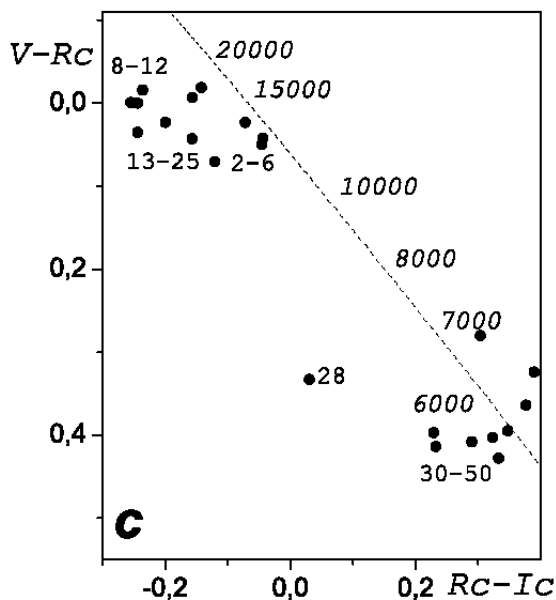
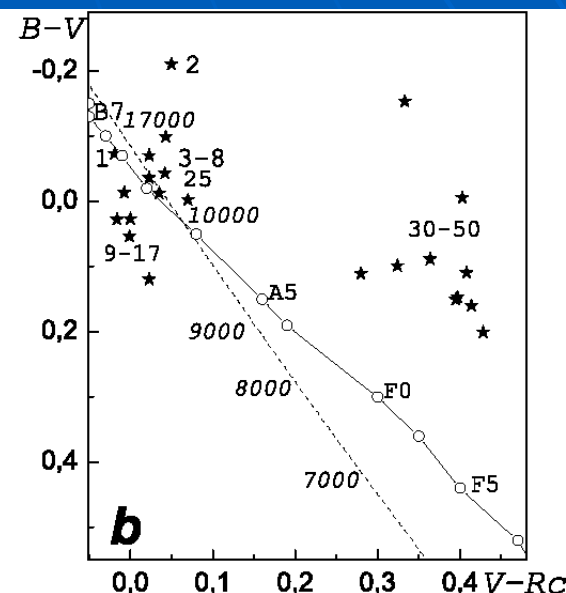
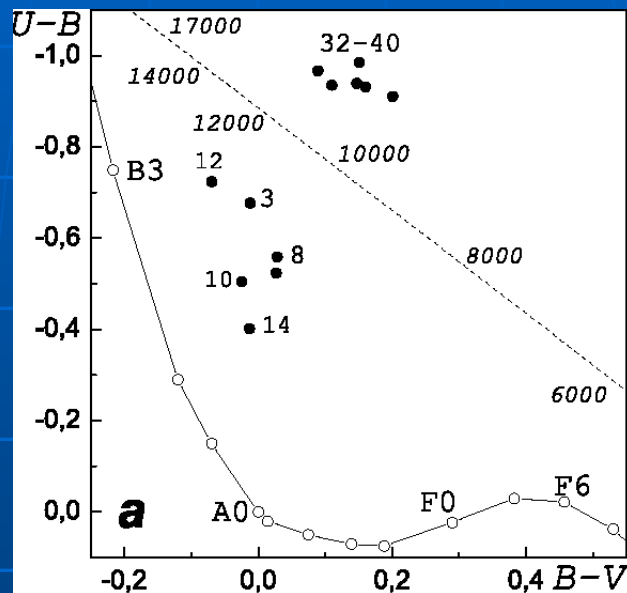
$$P_{\text{dot}} = (dP/dT) / P \sim 25 \times 10^{-5}.$$

Для большинства звезд типа WZ Sge и SU UMa среднее значение P_{dot} варьируется от 1 to 15 ($\times 10^{-5}$). Но существуют звезды с более высокими значениями P_{dot} -- от 15 до 70 ($\times 10^{-5}$).

Цветовые изменения блеска

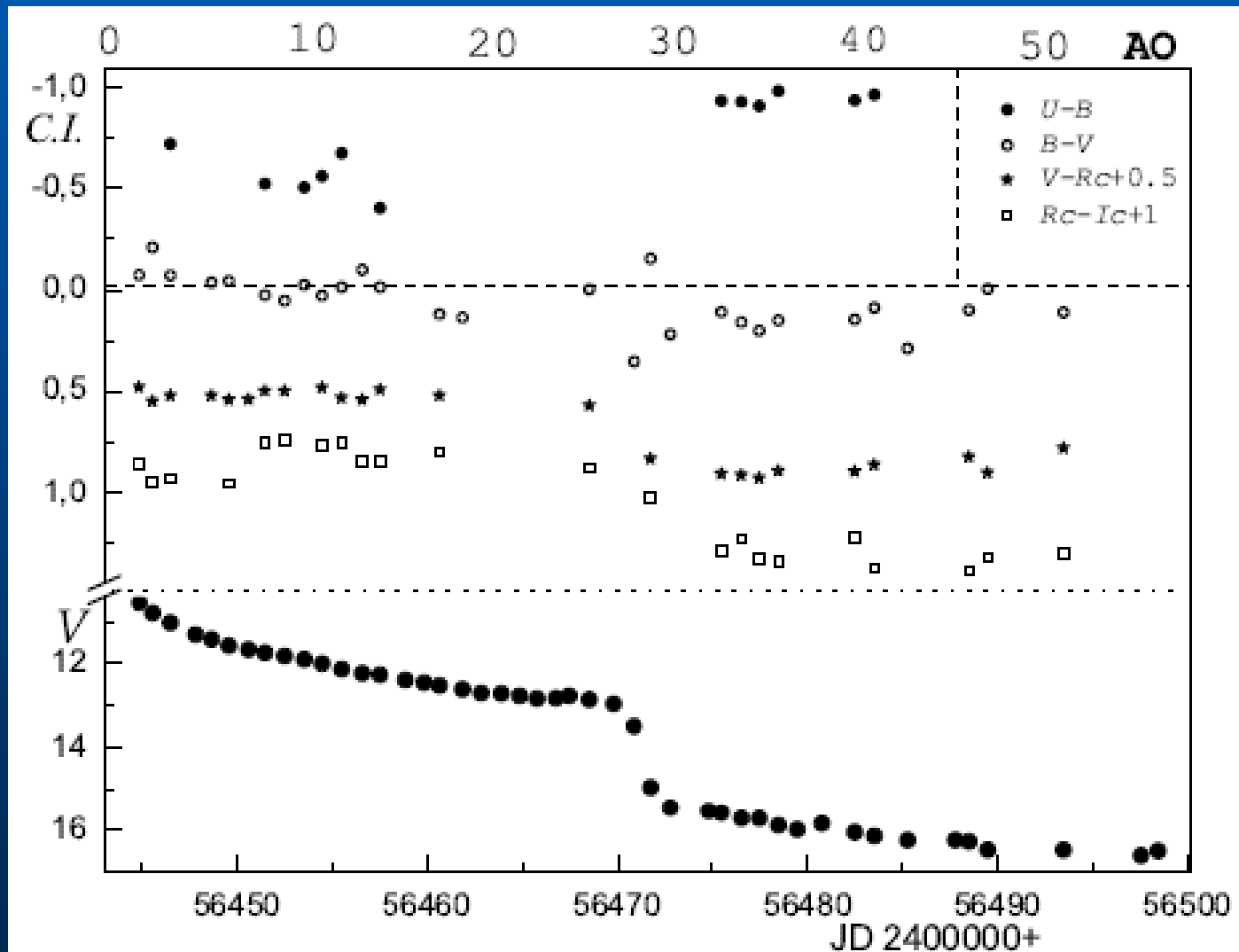
$E(B-V)=0.1-0.2$ mag

Цветовая
температура
во время
вспышки
 $\sim 15000\text{K}$, во
время
минимума
 $T \sim 7000\text{-}8000\text{K}$



После стадии плато видно
увеличение показателей
U-B на 0.5 mag,
параллельно цвета B-V,
V-R и, особенно,
R-I увеличиваются.

Изменение показателей цвета со временем, произошедшим после максимума блеска.



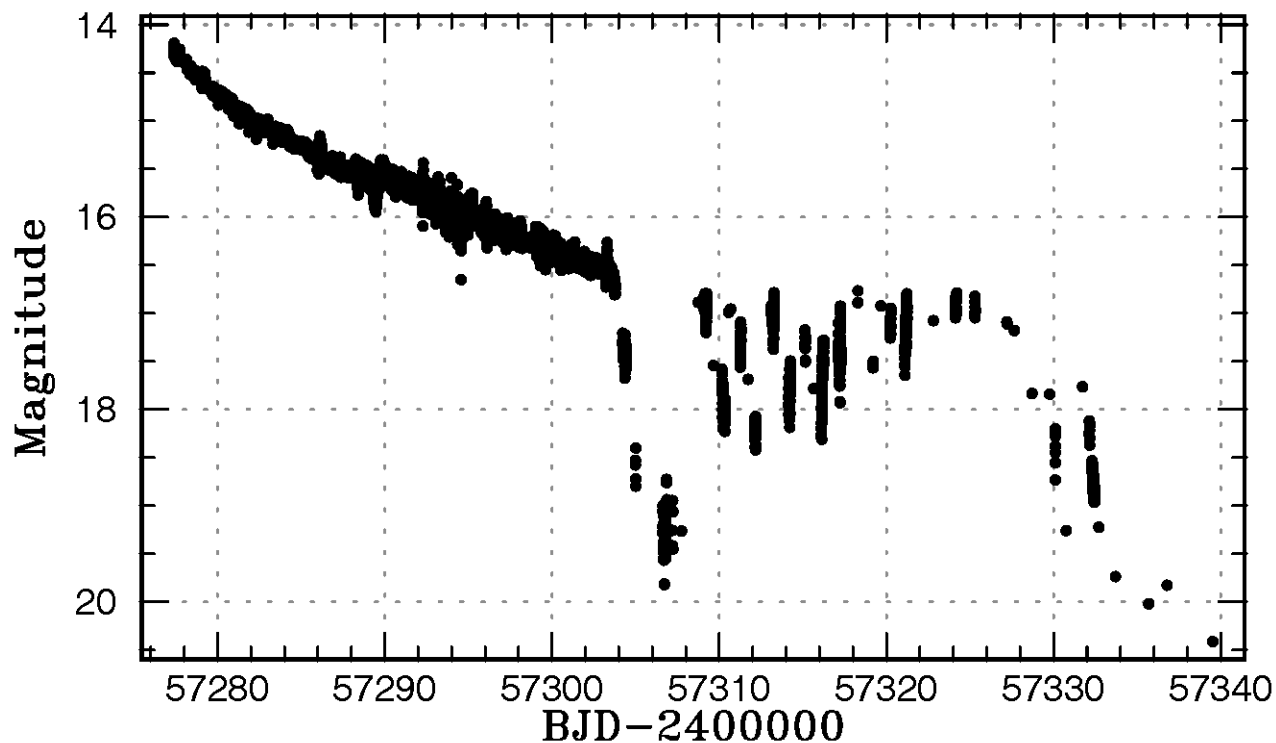
ASASSN-15po во время супервспышки и в спокойном состоянии

Переменная открыта во время вспышки в сентябре 2015 г. группой ASAS-SN. Результаты совместных наблюдений разных авторов опубликованы в статье Namekata et al., 2017, PASJ, 69. Наши наблюдения проводились в течение шести ночей и охватывают как дни вблизи максимального блеска звезды и на стадии плато, так и в поствспышечном состоянии, наблюдения проводились без фильтра на телескопах в Словакии и в Крыму.

Помимо
супервспышки
амплитудой в ~ 8
mag, на кривой
блеска видны
повторные
повышения
яркости, т.н.
rebrightening.

Супервспышка
длится около 28
дней,
последующие за
ней повышения
блеска – 24 дня.

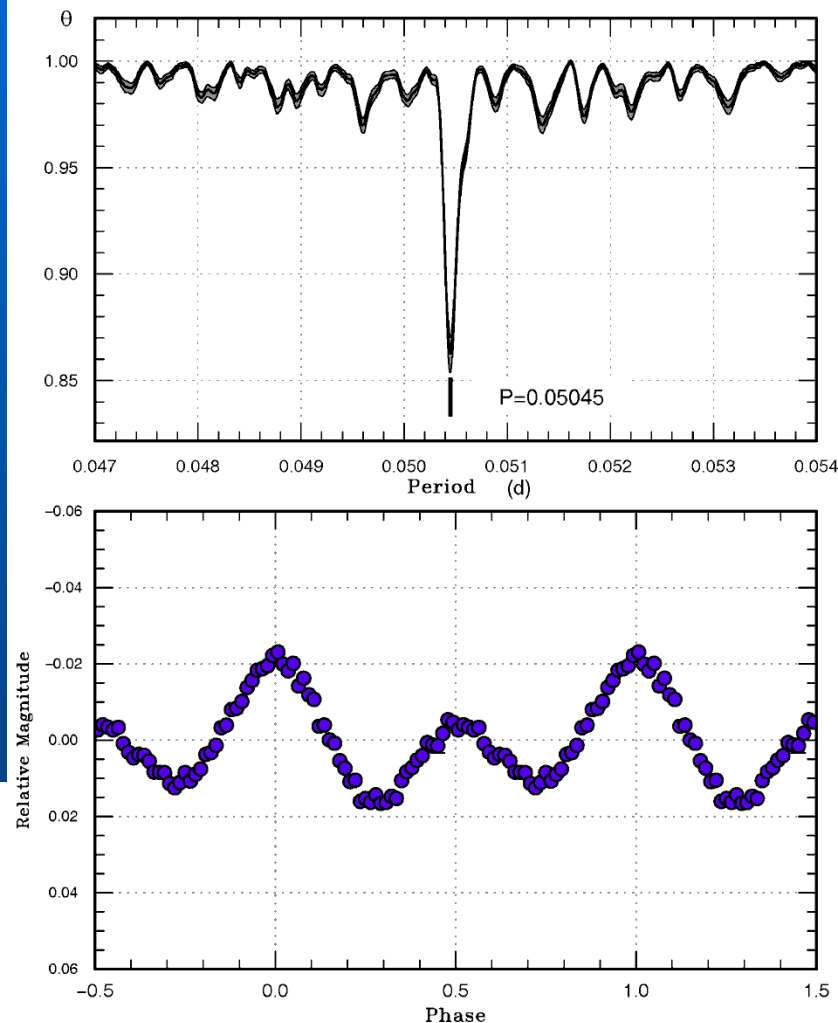
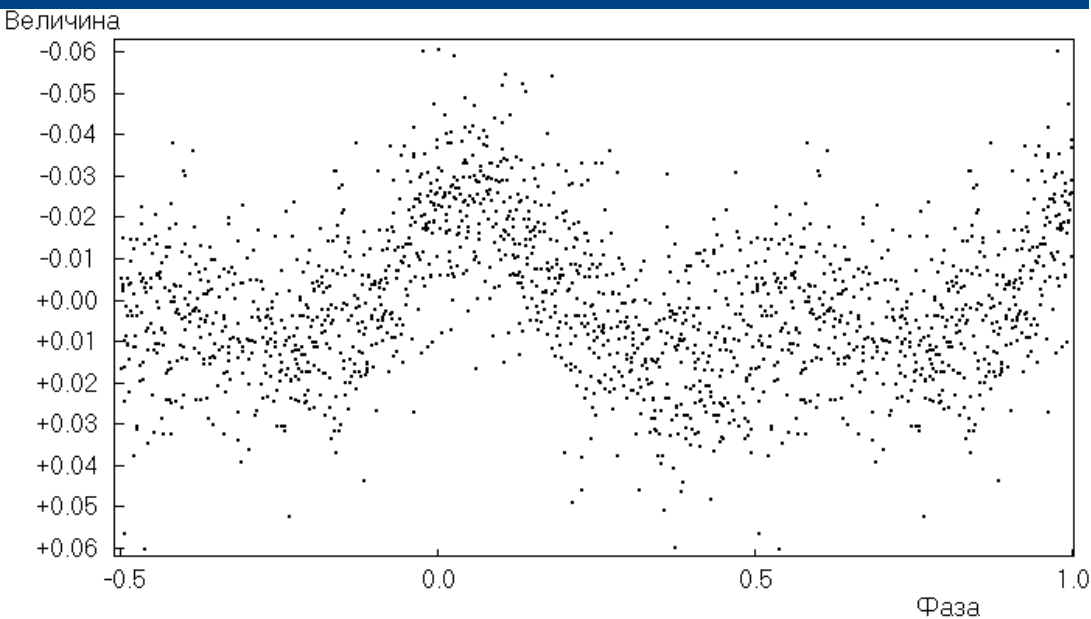
Сводная кривая блеска ASASSN-15po



Поиск периодичностей

Ранние суперхампы

Периодограмма и
фазовая кривая блеска
по данным наблюдений
в ночи JD 2457277-285
(рис. справа).



Свертка кривой блеска
за ночь JD 282 с
периодом в 0.05045
сут.

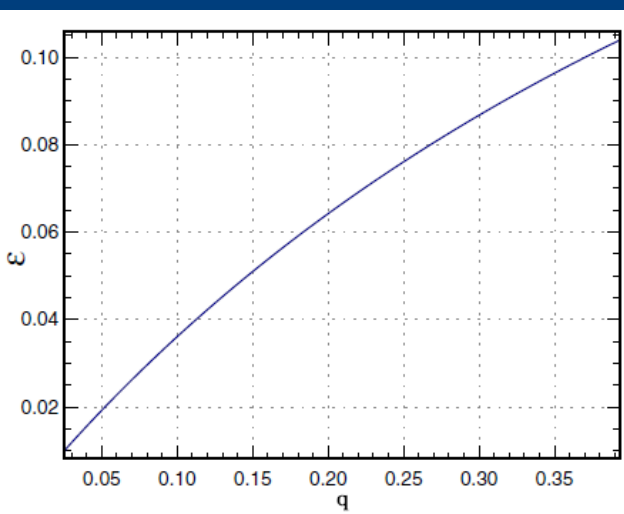
На диаграмме можно видеть четкий переход от «А» стадии к «В» на 48-м обороте системы. На «А» стадии происходит рост амплитуды суперхампов, далее, при переходе в «В» стадию, их амплитуда уменьшается, сам период плавно меняется со скоростью $P_{\dot{\text{dot}}} = (dP/dT) / P = 1.29(17) \times 10^{-5}$.

Определены периоды суперхампов:
 0.051809(13) d (ст. «А»); 0.050913(2)d («В»).

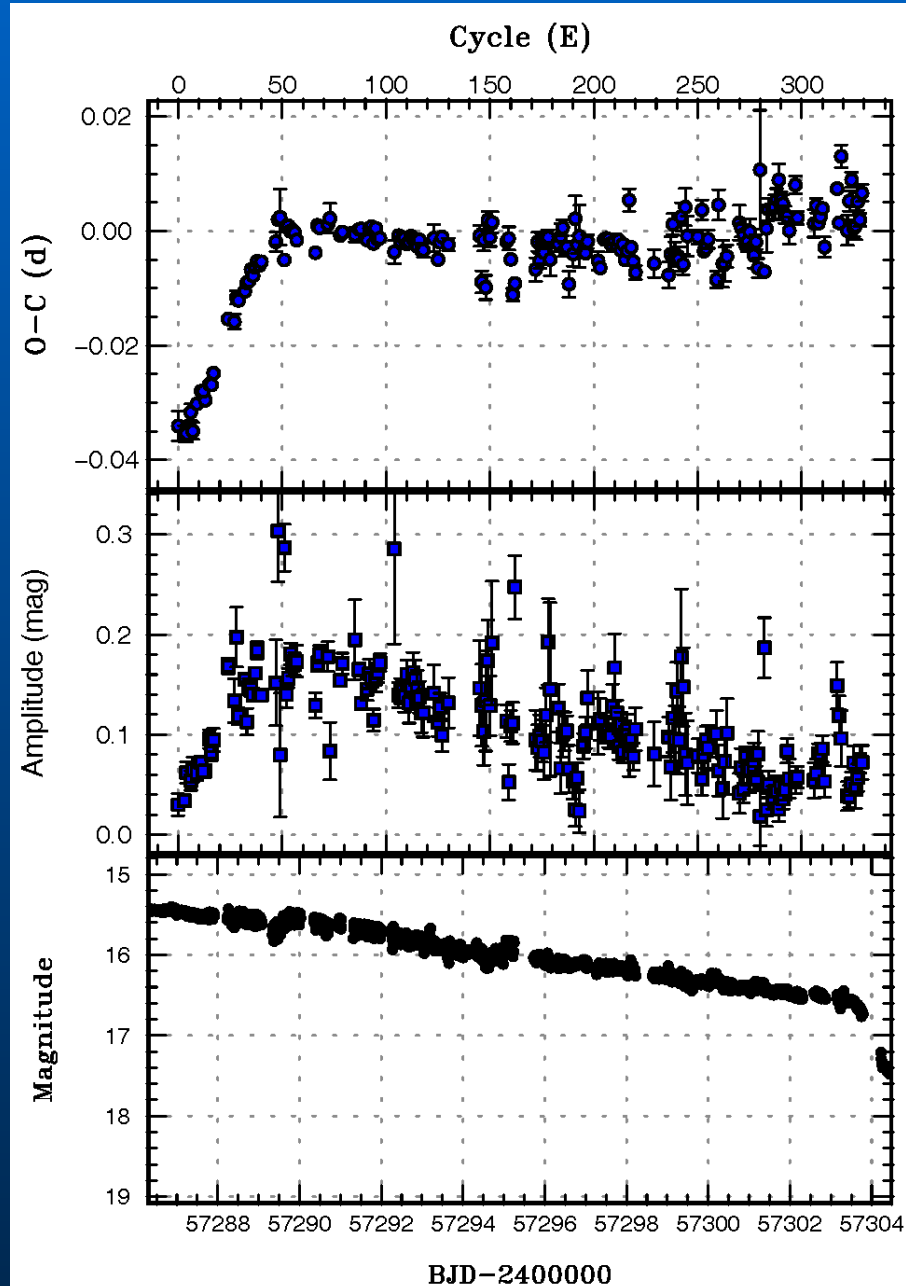
Избыток периода, соответствующий стадии «А»:
 $\varepsilon = 1 - P_{\text{orb}} / P_{\text{sh}} = 0.026$

Тогда используя зависимость из работы Kato&Osaki, 2013, PASJ, 65, 115 находим отношение масс: $q=0.0699(8)$

Используя $q = 0.0043(9) P_{\dot{\text{dot}}} \times 10^5 + 0.060(5)$,
 $q=0.066(7)$.

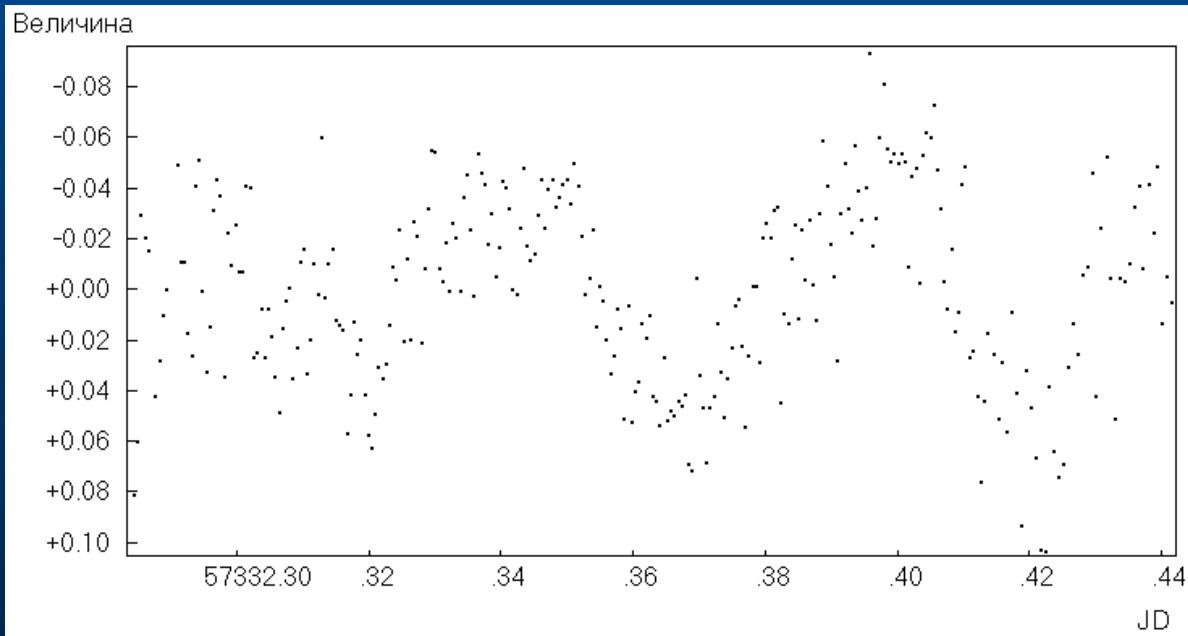
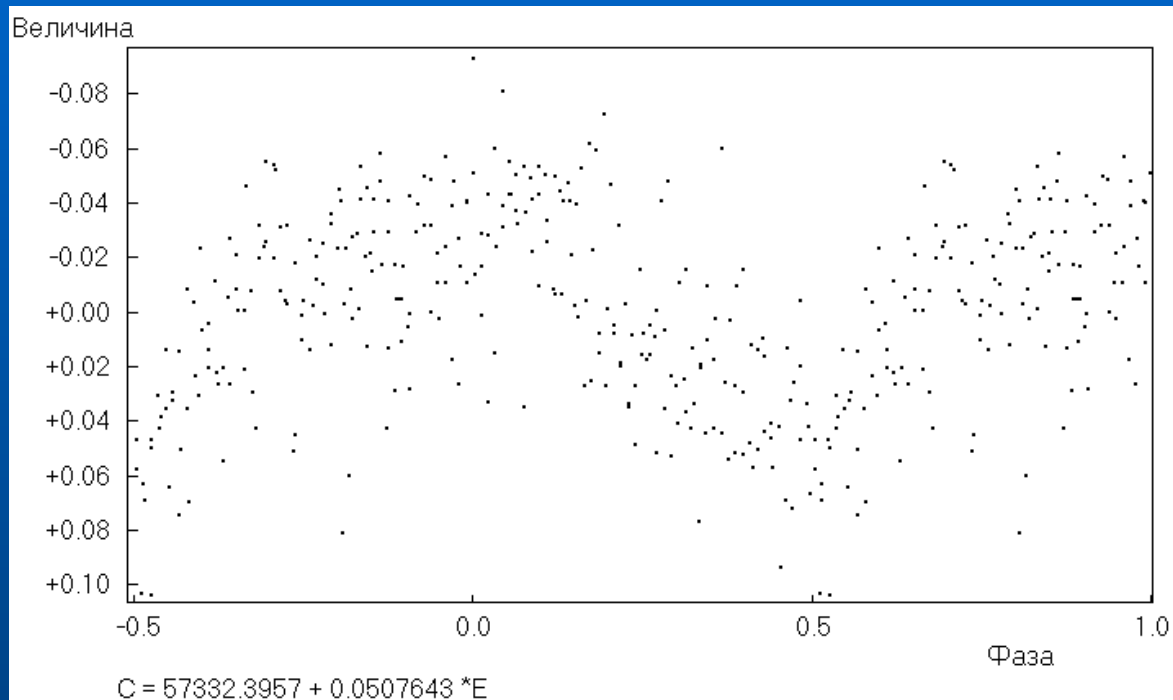


О-С диаграмма для ординарных суперхампов (JD 2457286-303)



Кривые блеска в спокойном состоянии

На спаде повторной
вспышки мы провели
поиск периода заново.
Период уменьшился:
 $P=0.0507643d$,
и стал близок к
орбитальному
(0.05045).



Звезды с нетипичными кривыми блеска

Многоцветная фотометрия карликовой новой HS 0218+3229

HS 0218+3229 (RA = 2^h21^m34^s, Del = +32° 43'.4, J2000) была впервые заподозрена как катаклизмическая переменная в работе Gänsicke et al (ASP Conf. Ser., 261, 190, 2002).

Позже звезда была изучена Родригес-Гилем и др. (*Astron. Astrophys.* **496**, 805, 2009). Авторы определили орбитальный период в 0.2972 суток, нашли, что расстояние до системы 0.9 - 1 кпк.

Вторичный компонент является звездой класса K5V и вносит до 80–85% вклада в общий блеск системы в полосе *R*.

Угол наклона оси и отношения масс найдены следующие:

$$i = 59^\circ \pm 3^\circ \quad 0.44 < M_1/M_{Sun} < 0.65$$

$$0.52 < q < 0.65 \quad 0.23 < M_2/M_{Sun} < 0.44$$

- Независимо звезда была открыта С. В. Антипиным в 2006 г. на негативах фототеки ГАИШ, им была найдена вспышка сентября 1980 г. с амплитудой около $4^m.5$ в полосе B_{pg} .
- Для более детального анализа мы получили более 2000 *UBVRI* ПЗС кадров с 2006 по 2013 гг. на 50-см телескопе в Словакии, 50 и 125-см телескопах Крымской лаборатории ГАИШ.
- Наши наблюдения зафиксировали еще две вспышки у объекта: в октябре 2007 г. и в сентябре 2013 г.

Сводные кривые блеска в полосах *UBVRcl* с 2006 по 2013 гг. Серыми точками обозначены наблюдения в системе *R_JI_J* (Джонсона).

Мы нашли следующие величины объекта во время вспышки 2007 г. (JD 2454384-385) :

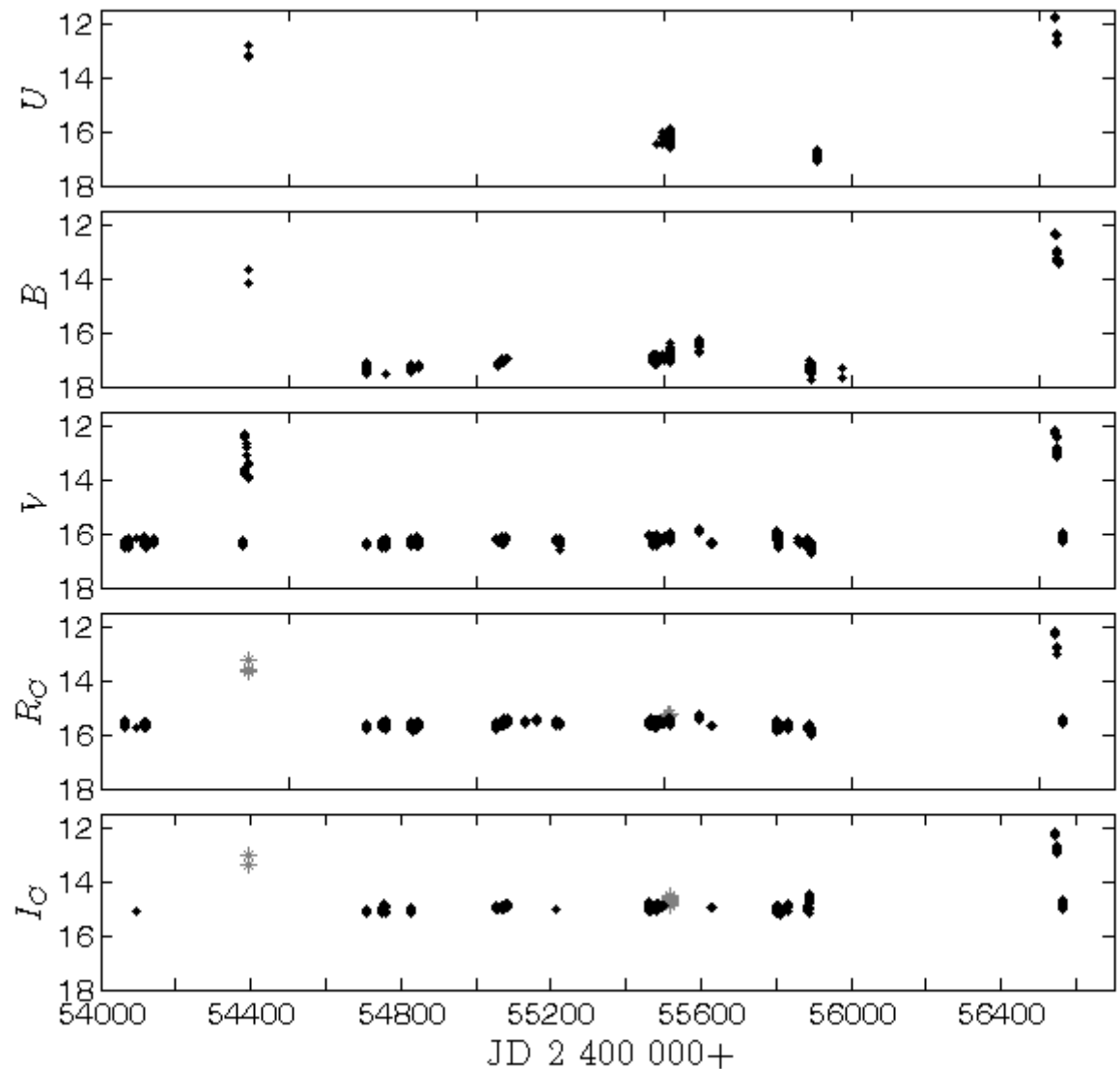
$$V_{max} \approx 12^m.34 \pm 0^m.05$$

$$U \approx 11^m.3 \pm 0^m.2$$

$$B \approx V \approx 12^m.3 \pm 0^m.2$$

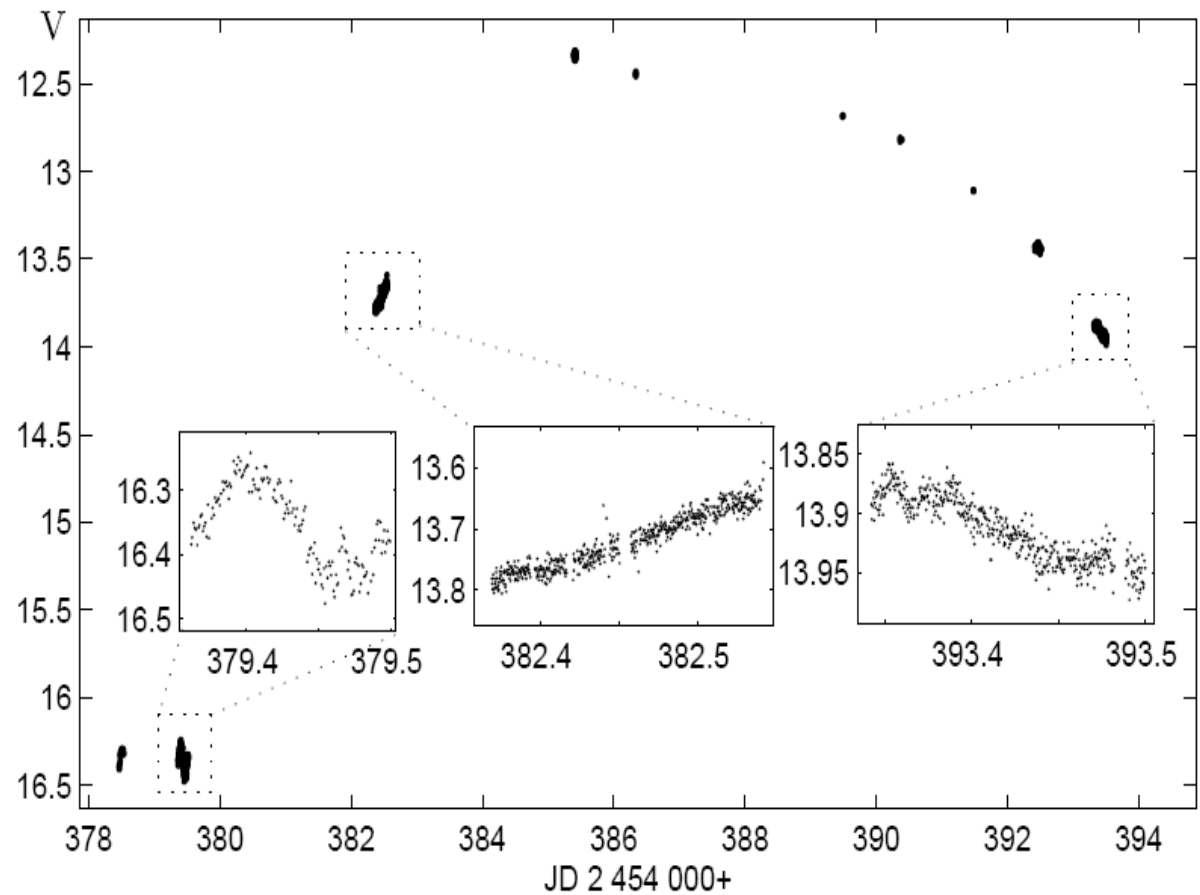
$$R_J \approx I_J \approx 12^m.2 \pm 0^m.2.$$

В неактивном состоянии наблюдается небольшая переменность блеска с амплитудой до 0.2 вел. и характерным временем в сотни суток.



Вспышка звезды 8-19 октября 2007

На фрагментах -- кривые блеска за отдельные ночи: на первом -- видна орбитальная волна, связанная с эллипсоидальностью вторичного компонента, на двух последующих внутренних графиках эти эффекты не заметны на фоне яркого вспыхнувшего диска.



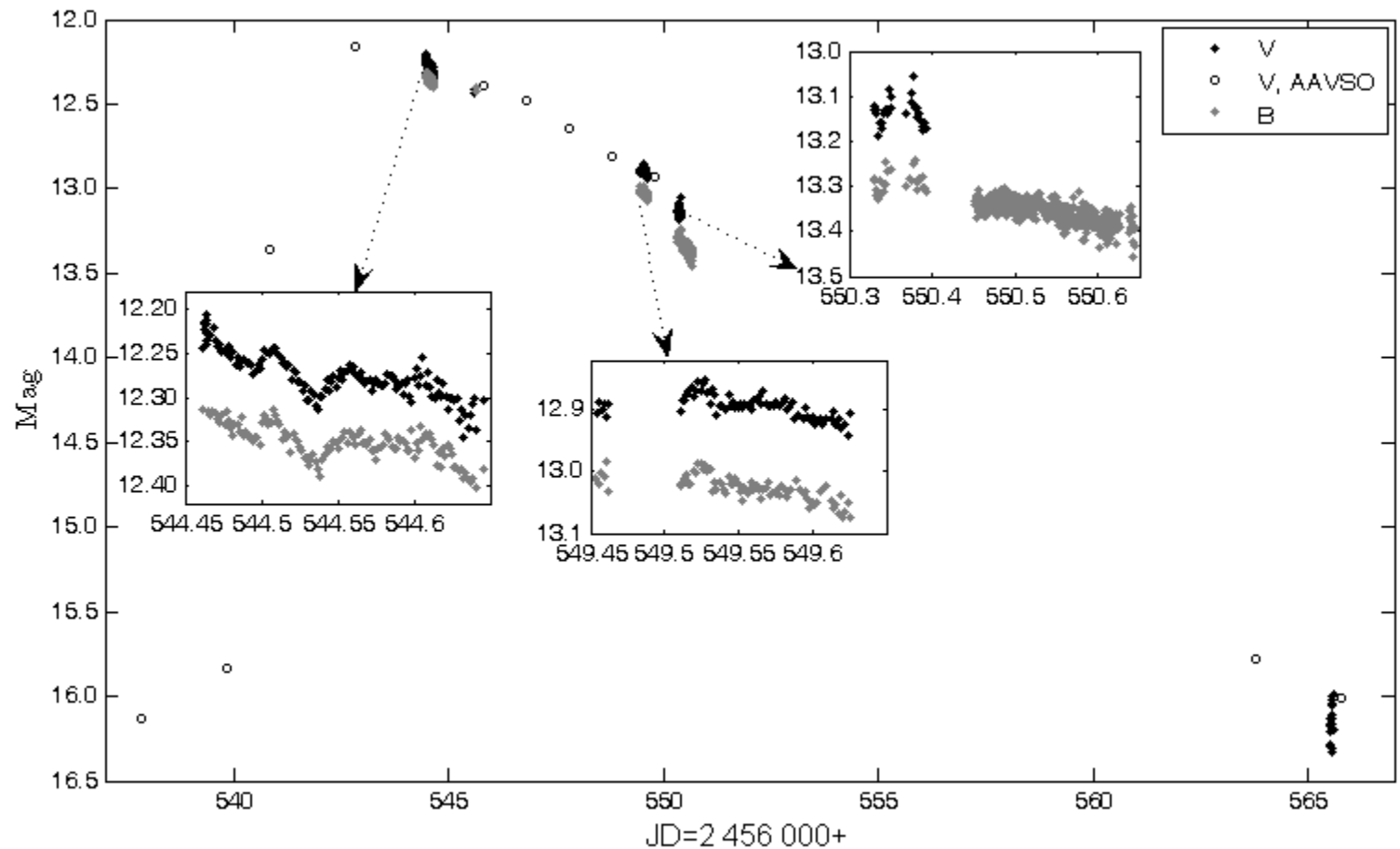
Наблюдения во время вспышки показали, что форма кривой блеска более симметричная, чем у большинства звезд типа SS Суг. Коэффициент асимметрии (отношение восходящей ветви к продолжительности вспышки) составляет ~ 0.22 .

Для самой звезды SS Cyg коэффициент асимметрии заключен в пределах 0.10–0.13.

Продолжительность вспышки мы оцениваем в 15–16 дней.

Такую форму кривой блеска HS 0218+3229 можно объяснить низким темпом перетекания вещества в системе. В этом случае вспышка зарождается во внутренних частях диска и распространяется во внешние его части – т.н. “inside-out” вспышка, см. статью Smak (PASP, 96, 575, 1984).

Амплитуда вспышки 2013 г. также составляет ~ 4 mag, однако ее продолжительность больше предыдущей и составляет ~ 28 дней.

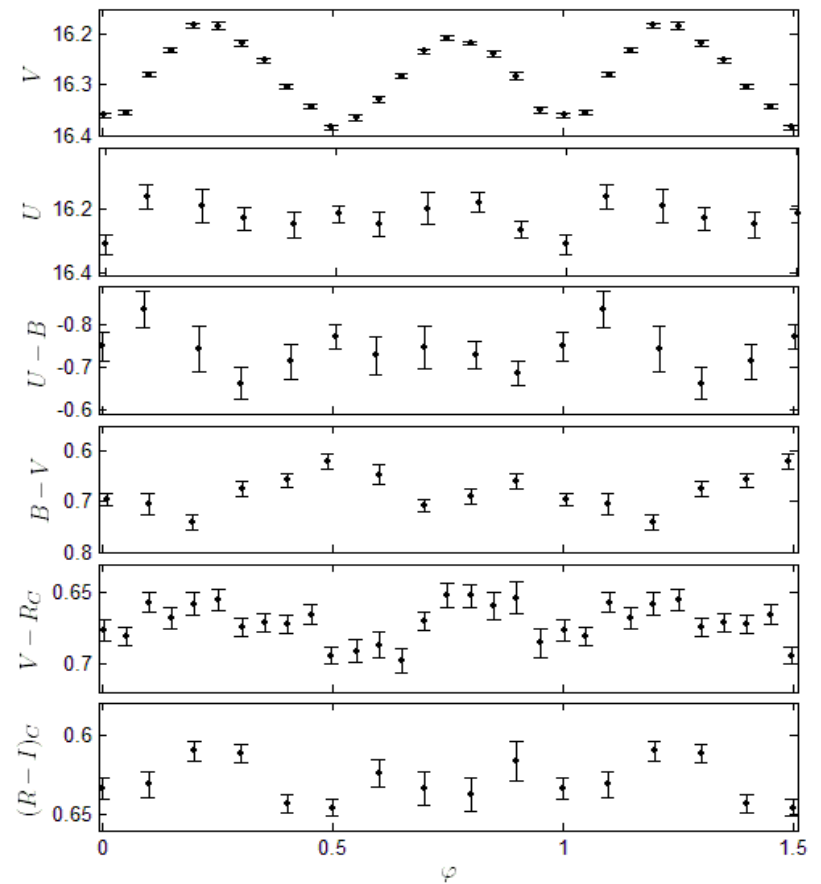
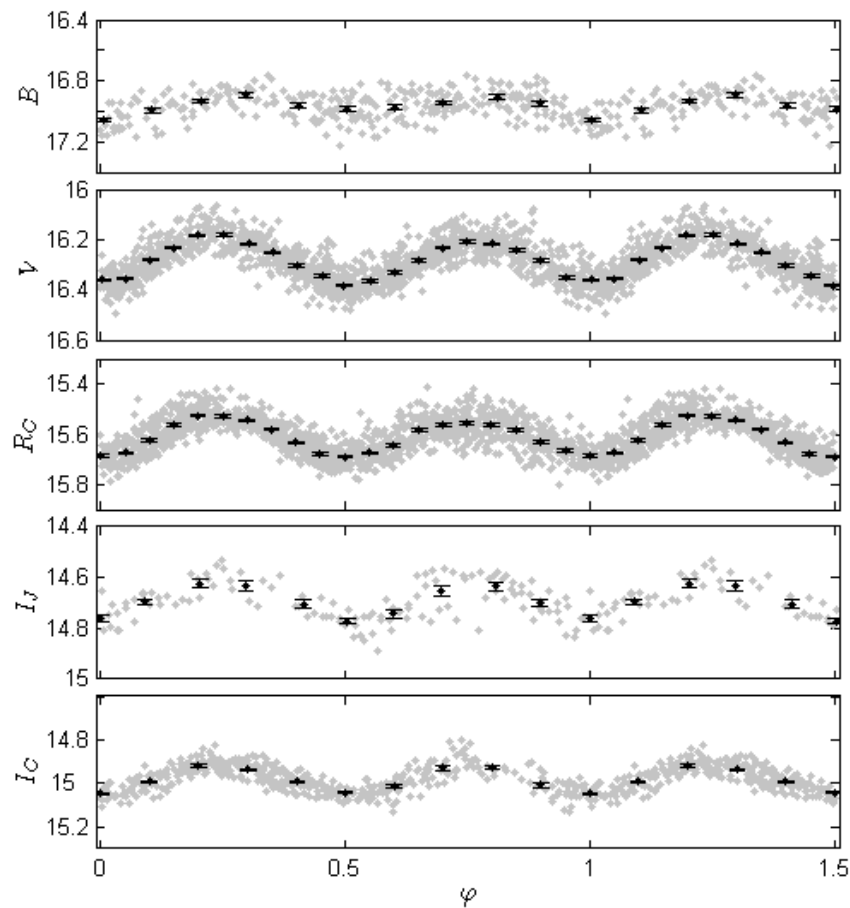


Фазовые кривые блеска

Мы нашли следующие световые элементы кривой блеска, удовлетворяющие как нашим наблюдениям, так и данным Родригес-Гиля:

$$JD_{hel}^{min} = 2453653.0286 + 0.2973559 \cdot E$$

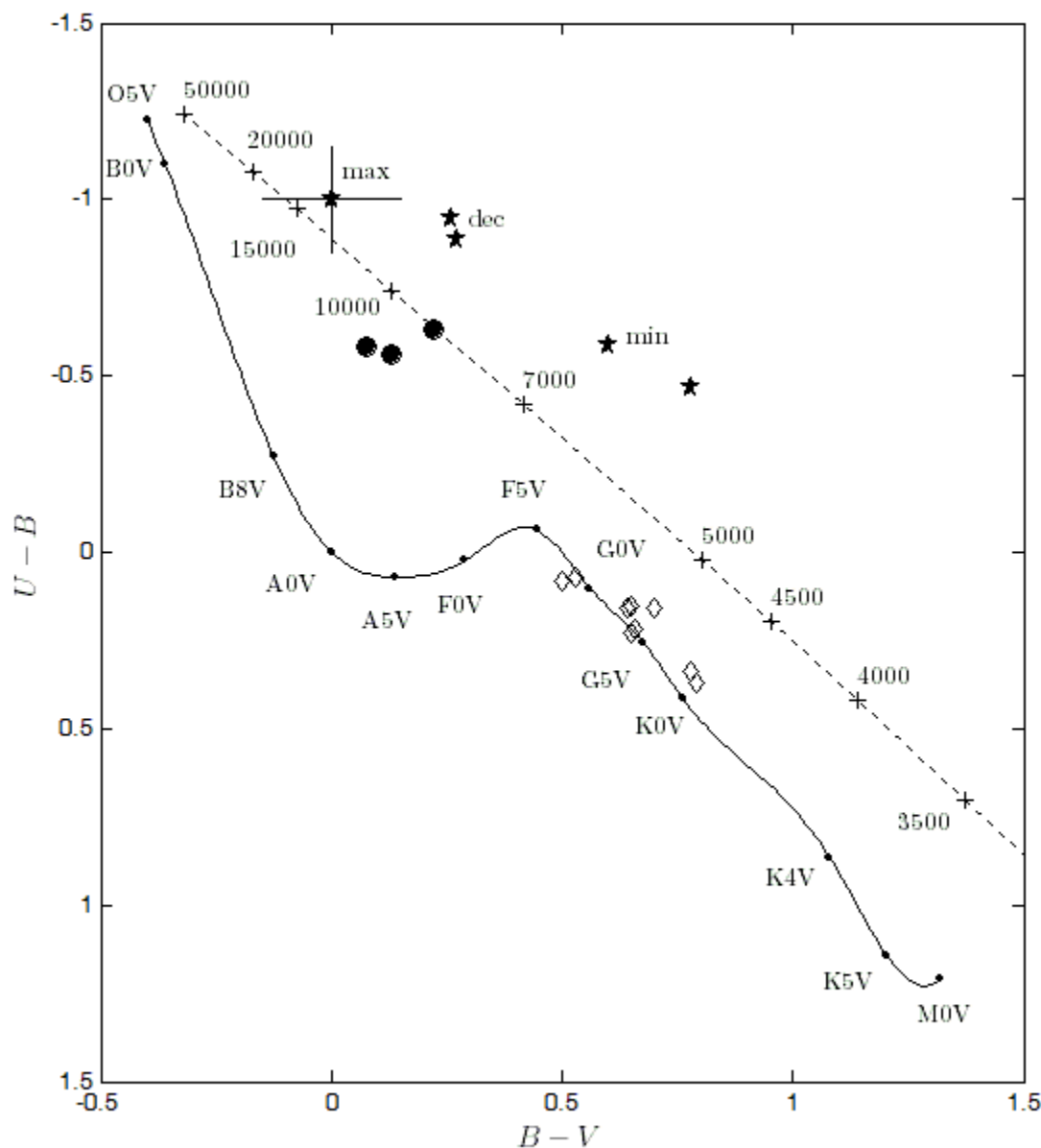
Эпоха минимума блеска, соответствующая прохождению вторичного компонента перед белым карликом, взята из работы Rodriguez-Gil et al., 2009.



В полосах U, V двойная волна видна не так отчетливо, заметно ослабление блеска на нулевой фазе. В остальных полосах наблюдается двойная волна с несколько различной амплитудой. Показатели цвета также изменяются с орбитальным периодом.

Двухцветная диаграмма U-B, B-V

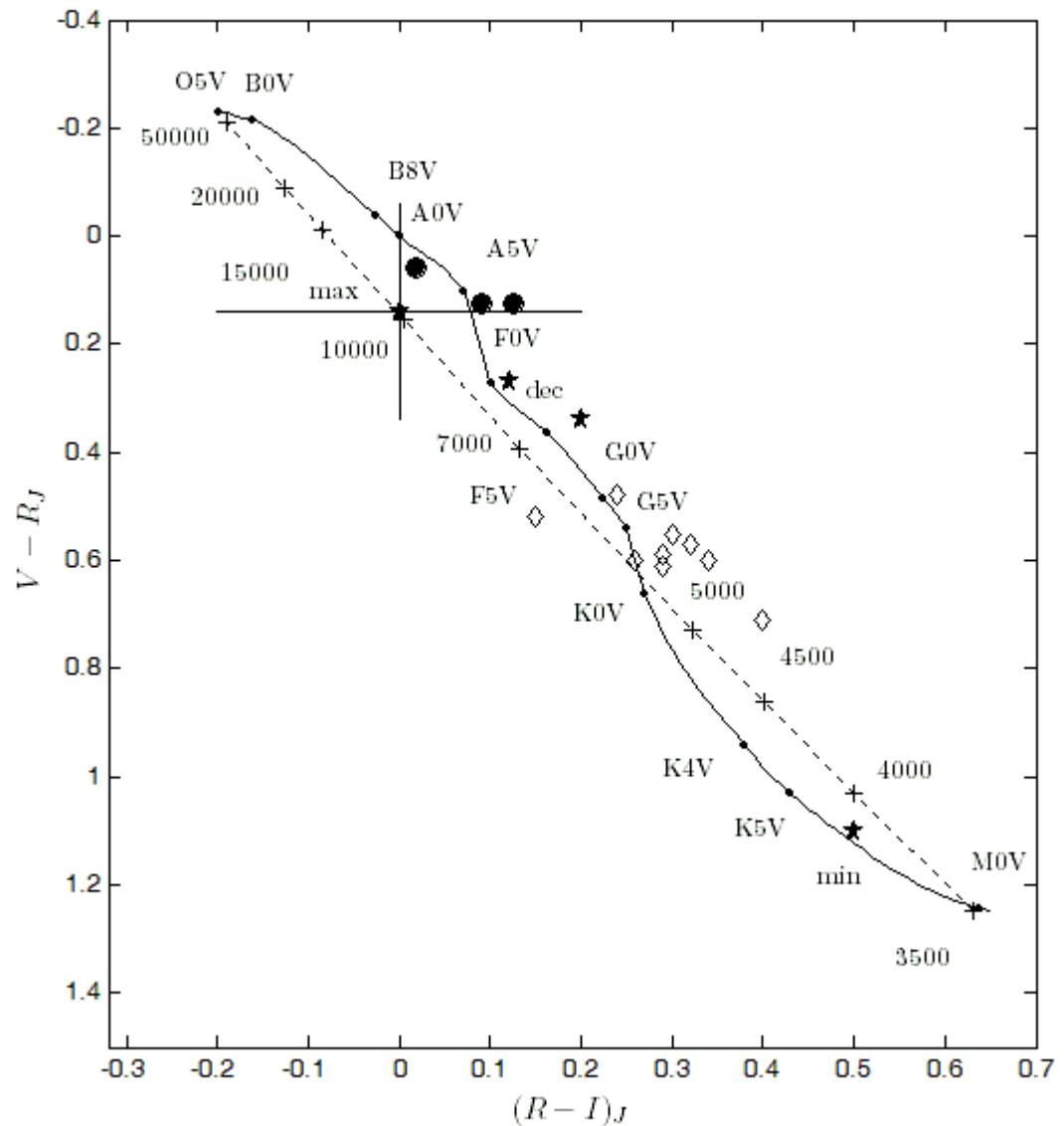
Звездочкой обозначены положения переменной во время максимума, на спаде и после вспышки 2007 г.; кружками обозначено положение переменной во время вспышки 2013 г.; ромбиками обозначены звезды сравнения. Крест задаёт неопределённость оценки показателей цвета во время максимума. УФ-избыток, вызванный вкладом горячего аккреционного диска, хорошо виден на диаграмме.



$(V-R)_J, (R-I)_J$

Обозначения те же, что на предыдущем рисунке.

В минимуме блеска положение переменной соответствует звезде спектрального класса K5V – K6V.



Оценка некоторых параметров системы

Так как в минимуме блеска положение переменной на двухцветной диаграмме соответствует звезде K5V, мы приняли, что $M_V = 7^m.1$.

Зная межзвездное поглощение $A_V = 0^m.2$, блеск звезды $V = 16^m.4$, получаем модуль расстояния $9^m.1$ и расстояние до системы $d \sim 660$ парсек. Во время вспышки $L_V = 1.6 \cdot 10^{34}$ эрг/с, $L_{bol} \sim 4 \cdot 10^{34}$ эрг/с.

Затменная карликовая новая
1SWASP J1621 (=V1460 Her)
во время вспышки

Первоначально звезда была идентифицирована как объект типа W UMa. Такие объекты являются контактными двойными системами и состоят из двух эллипсоидальных звезд класса А-К ГП. Период исследуемой звезды составляет 0.207852 d (Palaversa, 2013, Lohr, 2013, Drake, 2014).

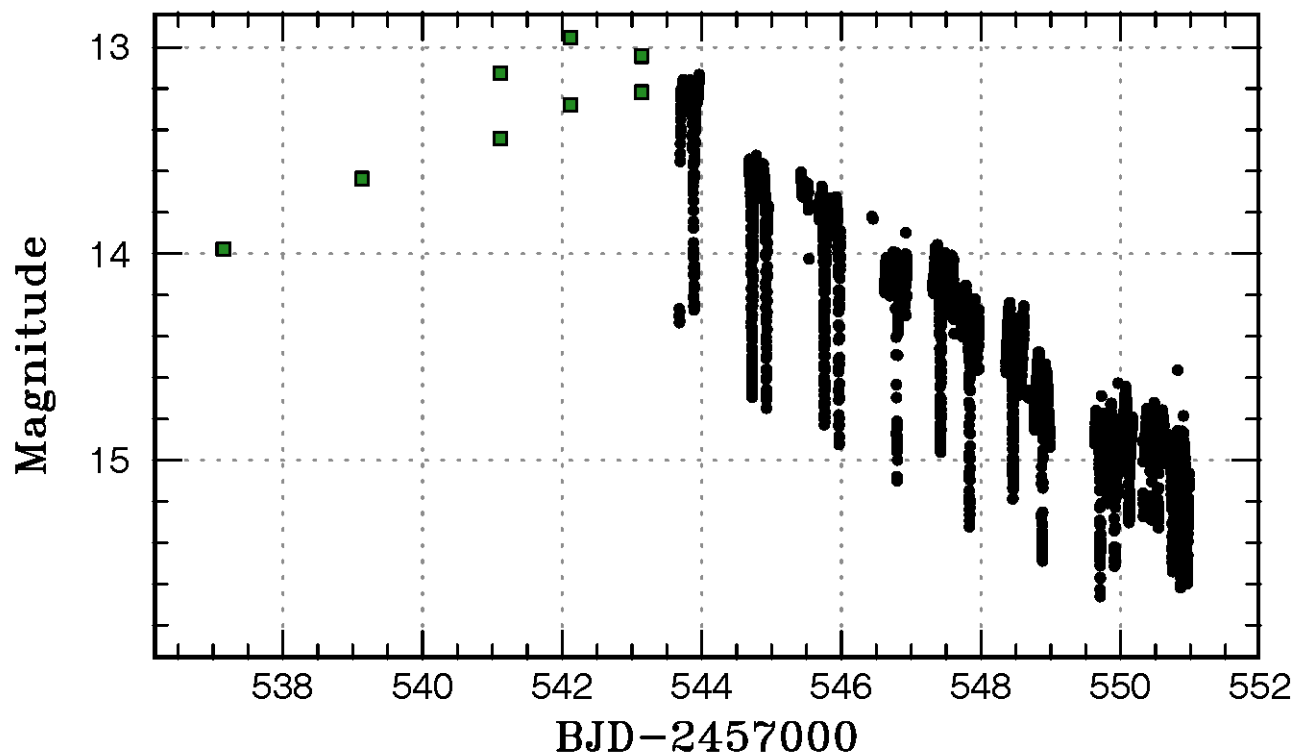
Сводная кривая блеска во время вспышки

Вспышку наблюдали многие наблюдатели, результаты этой совместной работы были включены в статью Kimura et al., 2016, PASJ, 68, 55.

Мы наблюдали звезду во время вспышки, и когда звезда вернулась в спокойное состояние, в июле, а также продолжили наблюдения весной 2017 г.

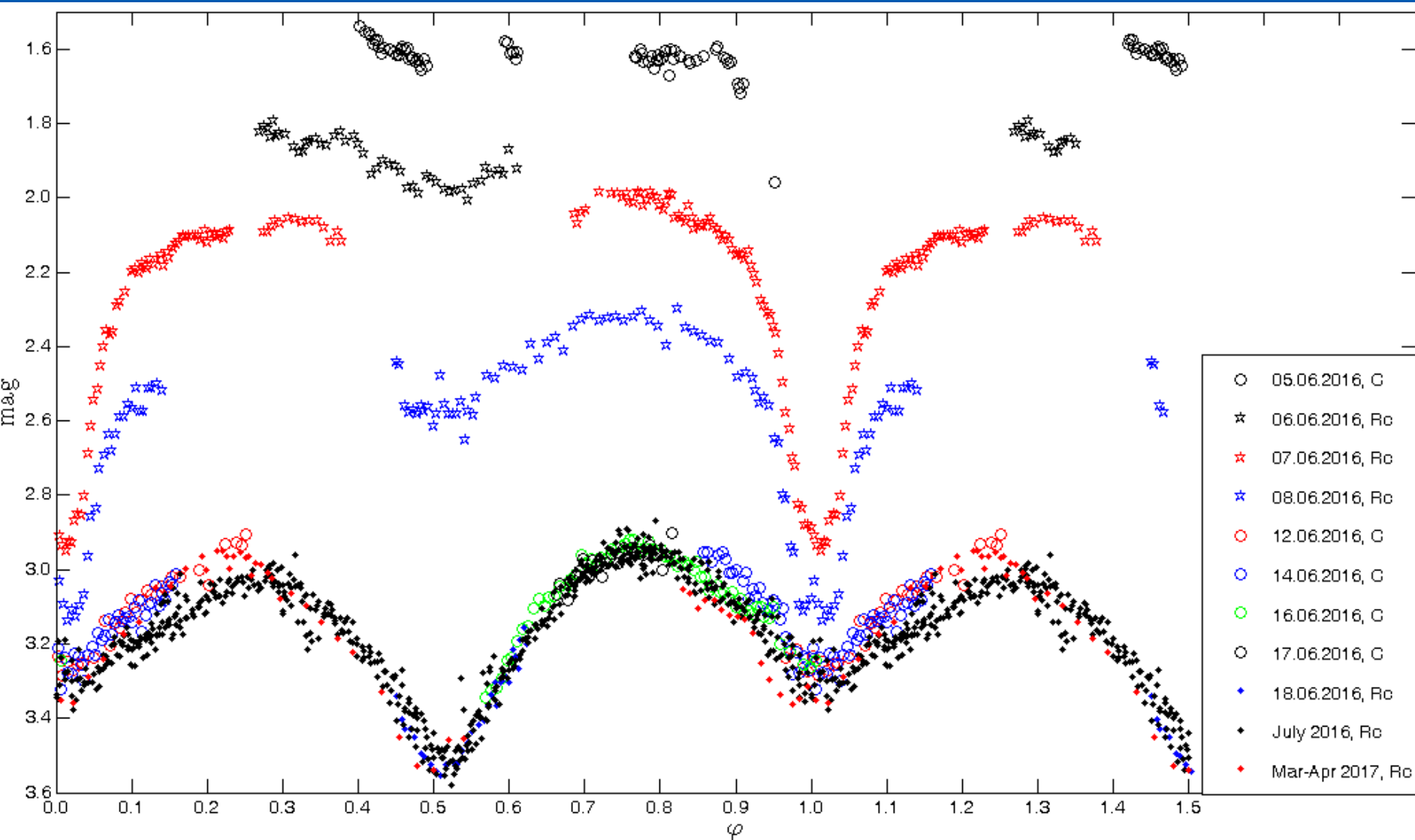
Продолжительность вспышки составила около двух недель, на рисунке также заметны суточные вариации блеска, глубина затмений достигает 1.2 mag, также видно что по окончании вспышки их глубина уменьшается, что будет подробно показано на следующих слайдах.

Однако в июне 2016 г. у звезды была зарегистрирована вспышка амплитудой ~ 2 mag, что изменило представление о природе этой звезды. Объяснить вспышку можно было, предположив, что эта двойная состоит из белого карлика и вторичной звезды. Drake, 2016 предположит что 1SWASP J1621 является карликовой новой, что подтвердилось спектральными наблюдениями.



Эволюция орбитальных кривых блеска

Свертки кривых построены по нашим наблюдениям с июня по июль 2016 г., также включены наблюдения следующего года. Видно, что вид кривых блеска спустя почти год после вспышки не изменился.



По результатам совместных наблюдений, Kimura et al. построили модель этой системы, предполагающей оптически толстый осесимметричный диск, вклад от горячего пятна не учитывался. В результате посчитаны параметры:

$i \sim 87^\circ$ (при известном ранее $q=0.44$);

$R_{\text{disk}}=(0.89-0.90) R_{L1}$, R_{L1} – расстояние между центром масс БК и внутренней точкой Лагранжа;

темп аккреции: $dM/dt=(5.1-5.5) \times 10^{-9} M_{\text{Sun}}/\text{год}$;

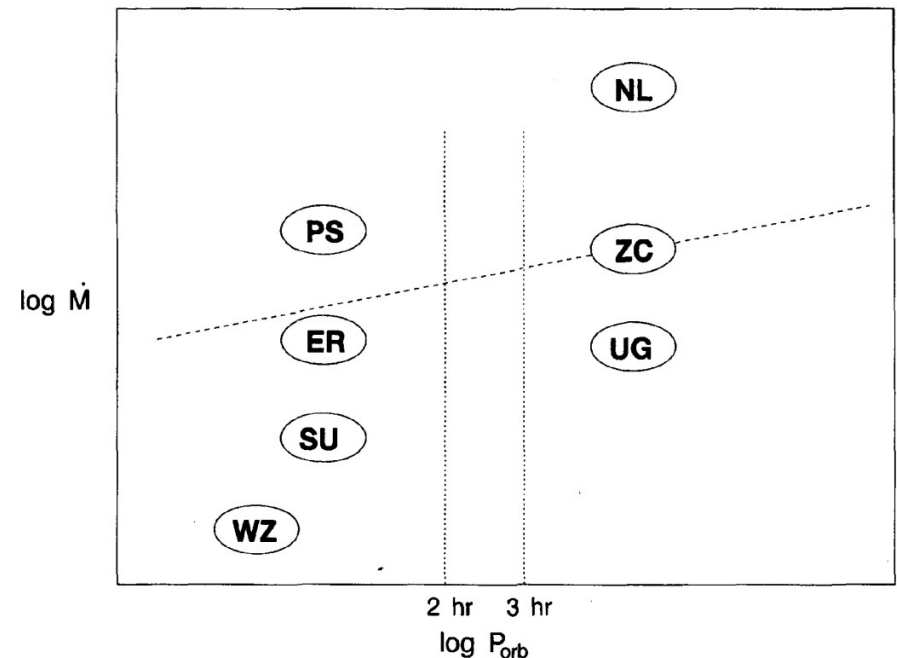
Расстояние до системы: $D \sim 166$ пк.

Проводя аналогии между 1SWASP J1621 и HS 0218, мы нашли еще два похожих объекта: VSX J052807.9+725606 и V361 Lyr, у которых также длинные орбитальные периоды (0.4 и 0.3 сут.), редкие вспышки, показатели цвета краснее, чем у большинства КП, двойная волна за орбитальный период. Суммируя вышесказанное, можно выделить новый подкласс КП, основными чертами которого, являются:

- Доминирующее излучение от красного карлика;
- Эффект эллипсоидальности;
- Длинные орбитальные периоды от 0.2 до 0.4 сут;
- Редкие вспышки;
- Медленное нарастание и спад блеска во время вспышки;
- Разрушение двойной волны, связанной с эффектом эллипсоидальности, во время вспышки.

Новоподобные звезды (НП) – это КП, у которых не наблюдается вспышек (Warner, 1995). Все объекты класса НП имеют долгопериодические изменения блеска относительно среднего значения зв. вел. По фотометрическим свойствам среди НП выделена группа звезд, которые время от времени обнаруживают резкое падение блеска на 1.5 зв. вел. и более (Honeycutt & Kafka, 2004). Это новоподобные типа VY Scl или т.н. “антикарликовые новые”.

Диаграмма $P_{\text{orb}}-\dot{M}$
из Osaki, PASP, 108, 39-60

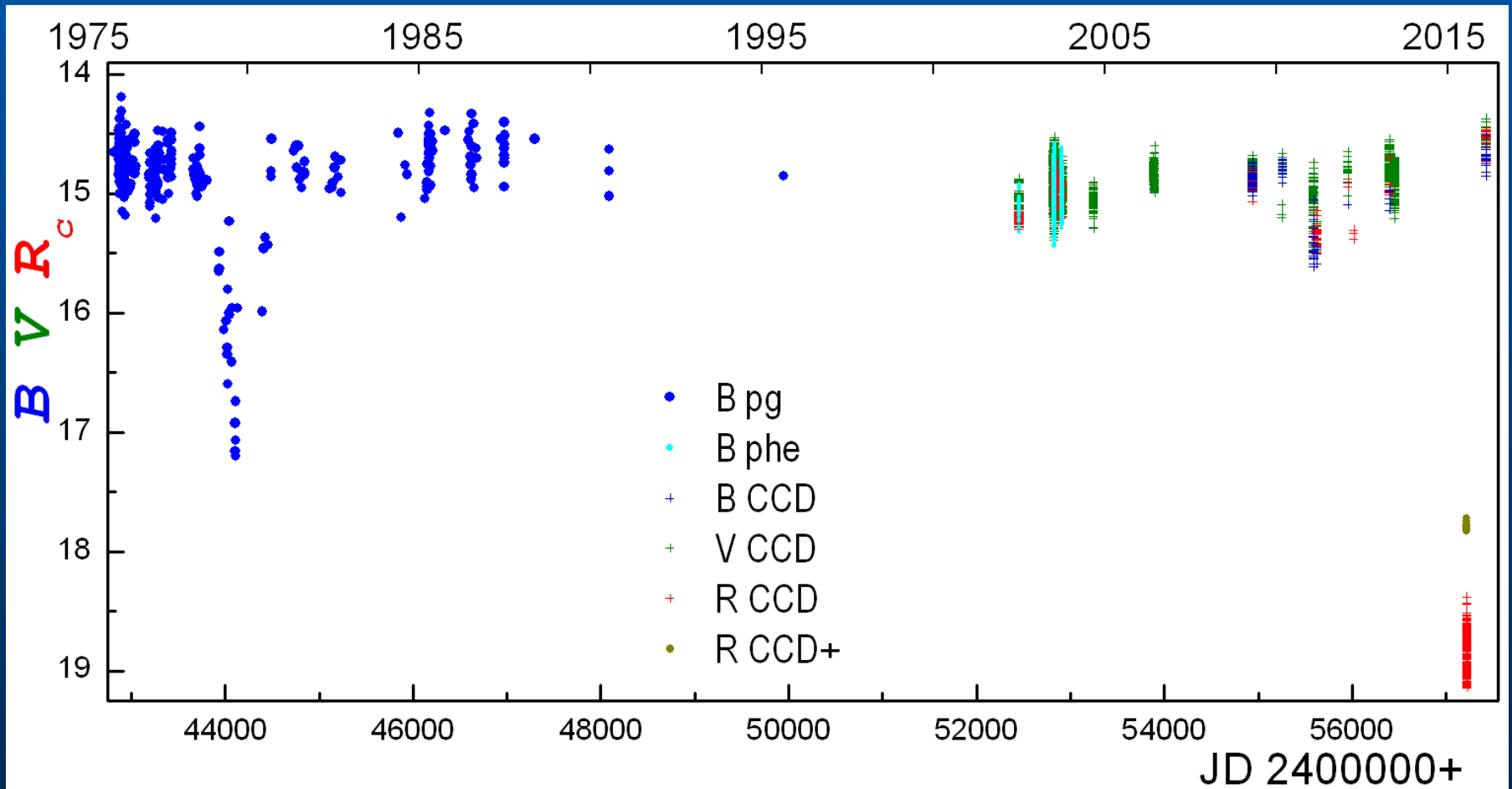


Фотометрическая переменность
новоподобной звезды V380 Ori в течение
1976-2016 гг.

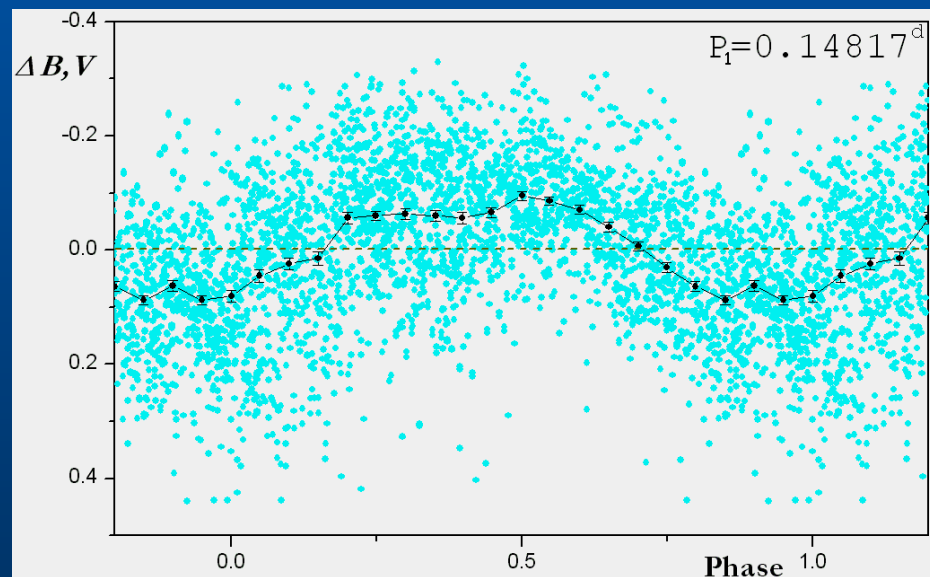
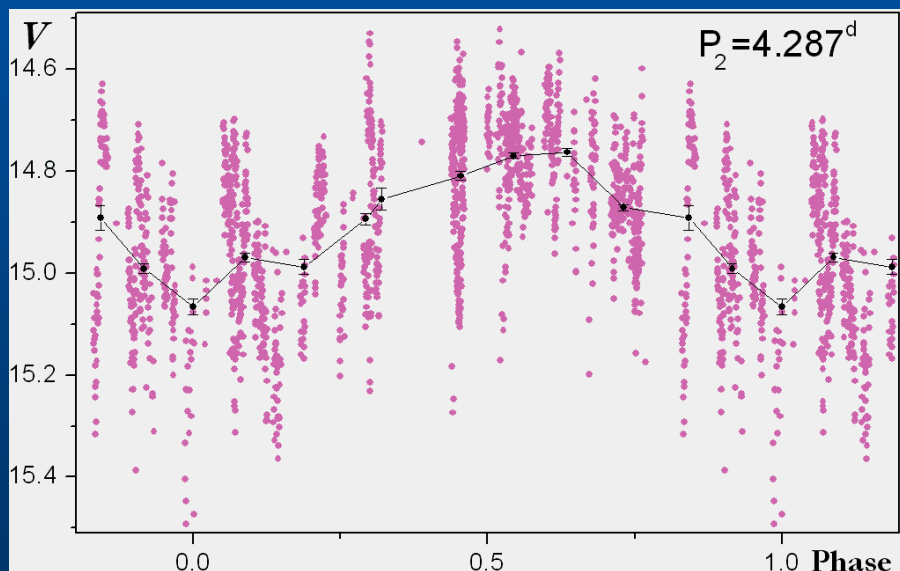
Кривая блеска V380 Oph в лучах BVR_c за последние 40 лет.

Обнаружены падения блеска в 1979 г. и 2015 г.

Для исследования оптической переменности объекта были проанализированы фотографические наблюдения, полученные на 40 см астрографе Крымской лаб. ГАИШ (1976-1990 гг.) и фотоэлектрические и ПЗС-наблюдения, полученные на 60 см и 125 см телескопах в России и Словакии (2002-2016 гг.). Нами было обнаружено резкое падение блеска до 4^m в июле 2015 г.



Для поиска периода были использованы фотоэлектрические и ПЗС-наблюдения, полученные за период 2002-2016 гг. Период $P_2=4.^d287$, найденный методом Фурье-анализа, оказался на 5% короче периода, найденного Шугаровым и др. (2005). Значение P_1 соответствует полученному ранее Шугаровым и др. и на 3.8% короче найденного Родригес-Гилем и др. (2007). Найденный нами период P_1 соответствует периоду отрицательных суперхампов (Родригес-Гиль и др., 2007).



Слева: фазовая кривая блеска в фильтре V , свернутая с периодом $4.^d287$. Справа: фазовая диаграмма отклонений B, V величин после вычитания волны $4.^d287$, свернутая с периодом $0.^d14817$.

Как итог вышесказанному, привожу здесь положения, выносимые на защиту:

- 1) Для V1239 Her исследована фотометрическая переменность в спокойном состоянии, проведен анализ профилей затмения и таких структур, как предзатменный горб и ступеньки на орбитальных кривых блеска. Уточнен орбитальный период, $0.100082222(2)d$, по нашим наблюдениям и по данным из литературы. Обнаружены изменения амплитуды предзатменного горба и его отсутствие в некоторые ночи. Эти результаты позволили построить «комбинированную» модель системы и проследить динамику изменений параметров системы в разных состояниях. Для другой изученной системы – новоподобной звезды UU Aqr, вид кривых блеска меняется даже в течение одного орбитального периода. Другой интересной особенностью звезды оказалось наличие плавных понижений блеска на внезатменной кривой, т.н. «дипы», которые объясняются структурными образованиями на диске.

2) Во время вспышечной активности впервые были исследованы три звезды типа SU UMa: OV Boo, PNV J1915 и ASASSN-15po. У OV Boo четко выраженных суперхампов во время вспышки зафиксировано не было, показано, что орбитальный период не менялся на протяжении 10 лет, несмотря на произошедшую вспышку. Для OV Boo впервые показано, как меняется форма затмений: от их отсутствия во время вспышки до красивого алголеподобного затмения вблизи стадии покоя. Дается интерпретация найденной особенности.

Приводятся наблюдения звезд PNV J1915 и ASASSN-15po во время супервспышек, обнаружены положительные суперхампы и прослежена эволюция их изменений, по величине избытка периода суперхампов вычислены отношения масс в системах, которые оказались равными ~ 0.08 и ~ 0.07 соответственно. По O-C диаграмме определено изменение периода суперхампов за один орбитальный период $P_{\text{dot}} = dP/dt/P$, которое оказалось равным 25×10^{-5} и 1.29×10^{-5} для PNV J1915 и ASASSN-15po соответственно. Также обнаружены ранние суперхампы, подтверждающие принадлежность этих объектов к подтипу WZ Sge.

Для PNV J1915 и OV Boo построены треки на двухцветных диаграммах (U-B)-(B-V), (B-V)-(V-R), (V-R)-(R-I), V-(V-R), показывающие изменение цветовой температуры со временем, произошедшим после вспышки.

3) Для звезды HS 0218 проведены детальные фотометрические наблюдения во время вспышек 2007 и 2013 гг. и в спокойном состоянии блеска в течение семи лет. Уточнен орбитальный период 0.2973559(10)d. Установлено, что орбитальная переменность блеска с амплитудой до 0.2 mag связана с эффектом эллипсоидальности красной звезды в спокойном состоянии системы, в то время как во время вспышки эти вариации блеска не проявляются на фоне вспыхнувшего аккреционного диска. Показано, что вспышки звезды относятся к типу “inside-out”. Найдено, что вторичный компонент является звездой спектрального класса K5 V. Получены оценки полной светимости диска во время вспышки: $L_{bol} \sim 4 \times 10^{34}$ эрг/с и расстояния до системы ~ 660 пк. Согласно общепринятой классификации ОКПЗ, звезда является карликовой новой с редкими (раз в 5-6 лет) вспышками, имеющими более симметричную форму, чем у большинства звезд этого типа.

4) По фотометрическим наблюдениям уточнена классификация двух переменных звезд с нетипичными кривыми блеска -- 1SWASP J1621 и V380 Oph. Исследования затменной системы 1SWASP J1621 проведены как во время вспышки, так и в спокойном состоянии, прослежена эволюция орбитальной переменности этой звезды, подтверждена принадлежность к карликовым новым. Сравнение найденных автором фотометрических характеристик 1SWASP J1621 и HS 0218 позволило сделать вывод об их сходстве. В обеих системах в состоянии покоя орбитальная переменность показывает двойную волну, показатель цвета V-R относительно велик: ~ 0.6 mag для 1SWASP J1621 и ~ 1.1 mag для HS 0218, красный карлик вносит наибольший вклад в светимость системы, в отличие от классических звезд типа UGSS.

Поскольку было обнаружено еще два подобных объекта, сделано предположение о существовании нового подкласса карликовых новых. Характерными чертами этих объектов является доминирующее излучение от красного карлика на стадии покоя; эффект эллипсоидальности на стадии покоя и его исчезновение во время вспышки; относительно большие орбитальные периоды продолжительностью в несколько часов; редкие вспышки с медленным нарастанием блеска и плавным спадом.

Для новоподобной звезды V380 Oph, которая обычно пребывает в ярком состоянии на уровне ~ 14.5 mag, найдено падение блеска до 4 mag, произошедшее в 2015 г., что доказывает принадлежность звезды к объектам типа VY Scl. Уточнен прецессионный период в 4.29 d, и период близкий к орбитальному в 0.148 d, который является, вероятнее всего, периодом отрицательных суперхампов у этой системы.

Спасибо за внимание